

Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone

李三忠^{1,2,*}, 索艳慧^{1,2}, 李玺瑶^{1,2}, 王永明^{1,2}, 曹现志^{1,2}, 王鹏程^{1,2}, 郭玲莉^{1,2}, 于胜尧^{1,2}, 兰浩圆^{1,2}, 李少俊^{1,2}, 赵淑娟^{1,2}, 周在征^{1,2}, 张臻^{1,2} and 张国伟³

Citation: [科学通报](#) **63**, 1550 (2018); doi: 10.1360/N972017-01113

View online: <https://engine.scichina.com/doi/10.1360/N972017-01113>

View Table of Contents: <https://engine.scichina.com/publisher/scp/journal/CSB/63/16>

Published by the [《中国科学》杂志社](#)

Articles you may be interested in

[Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences **57**, 2853 (2014);

[Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean: Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences **61**, 386 (2018);

[Subduction history of the Paleo-Pacific slab beneath Eurasian continent: Mesozoic-Paleogene magmatic records in Northeast Asia](#)

SCIENCE CHINA Earth Sciences **61**, 527 (2018);

[LATE PALEOZOIC OCEAN-CONTINENT TRANSITION IN WEST JUNGGAR, CENTRAL ASIAN OROGENIC BELT: EVIDENCE FROM LATE CARBONIFEROUS RHYOLITES](#)

Journal of Geomechanics **23**, 150 (2017);

[History of tectono-magmatic evolution in the Western Kunlun Orogen](#)

Science in China Series D-Earth Sciences **42**, 604 (1999);

西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应

李三忠^{1,2*}, 索艳慧^{1,2}, 李玺瑶^{1,2}, 王永明^{1,2}, 曹现志^{1,2}, 王鹏程^{1,2}, 郭玲莉^{1,2}, 于胜尧^{1,2}, 兰浩圆^{1,2}, 李少俊^{1,2}, 赵淑娟^{1,2}, 周在征^{1,2}, 张臻^{1,2}, 张国伟³

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质功能实验室, 青岛 266237;

3. 西北大学地质学系, 西安 710069

* 联系人, E-mail: sanzong@ouc.edu.cn

2017-10-24 收稿, 2018-03-13 修回, 2018-04-04 接受, 2018-05-25 网络版发表

国家重点研发计划(2017YFC0601401)、国家海洋局“全球变化与海气相互作用”专项(GASI-GEOGE-1)、山东省“泰山学者”特聘教授计划、青岛海洋科学与技术国家实验室“鳌山人才卓越科学家”计划(2015ASTP-0S10)和国家自然科学基金委-山东省联合基金(U1606401)资助

摘要 中生代期间, 华北与华南地块受西太平洋的板块俯冲过程、东亚大陆边缘深浅部过程的影响, 其构造、岩浆、成矿、地貌演化趋势表现出一些共性, 但也存在显著差异, 其动力机制一般认为由古太平洋板块俯冲所致, 但是它们是如何关联的, 长期未得到解决, 是地质研究的难点和热点, 存在巨大争论. 本文系统评述了近十年来已有东亚大陆边缘的构造变形分析、岩浆岩年代学、层析成像等多学科成就, 简要探讨了前燕山期的中国陆块的最终聚合、统一陆缘的形成, 随后主要侧重综述侏罗纪、白垩纪东亚洋陆过渡带燕山期地质过程的新认识. 本文将浅部构造变形规律、岩浆岩年龄分带和迁移、地形巨大反转, 与深部过程紧密结合, 提出: 华北克拉通破坏过程总体受深部岩石圈早幕向西的分层回卷折沉、减薄制约, 导致早期构造、岩浆作用伴随西迁, 中幕多向折沉, 晚幕折沉向东回撤; 同时, 北部鄂霍茨克洋闭合与南部班公湖-怒江俯冲系统的同期联合作用使得东亚洋陆过渡带总体处于挤压背景下, 且深部上涌的软流圈不断向东跃迁, 带动岩石圈不断向东、幕式、交替性伸展和挤压. 华南深部早期则经历了向西平板俯冲, 导致变形和岩浆作用西迁; 后期发生两幕折沉, 导致构造-岩浆作用向东跃迁. 总之, 华北与华南构造-岩浆差异的内因是深部过程, 外因是东亚大汇聚的差异所致.

关键词 洋陆过渡带, 古太平洋板块, 东亚, 燕山期, 大陆边缘, 俯冲后撤

华北、华南地块是东亚洋陆过渡带的两个核心地块, 处于西太平洋三角区内^[1,2], 北为中亚造山带, 南为新特提斯造山带, 东为(古)太平洋俯冲带所围限. 燕山期东亚地区是基梅里地体群、古太平洋板块与欧亚板块超级汇聚(super-convergence)的复杂地带^[3], 也是中生代物质流(金属成矿带)-能量流(地震-火山活动带)-基因流(生物辐聚区)的全球汇聚中心, 还是

水圈(印度洋-太平洋水团交换)-大气圈(东亚季风-印度季风协同演变)-生物圈(生物多样性最丰富的区域)-岩石圈(大陆-大洋岩石圈交接转换)等多圈层跨界、跨层、跨带、跨圈、跨相相互作用的壳幔-海洋-大气巨系统. 中-新生代期间, 其东、西两侧分别受(古)太平洋俯冲和新特提斯洋消亡-印度洋打开的控制, 中生代早期东亚洋陆过渡带南部和北部还与新特

引用格式: 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应. 科学通报, 2018, 63: 1550-1593

Li S Z, Suo Y H, Li X Y, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1550-1593, doi: 10.1360/N972017-01113

提斯洋、古亚洲洋消亡或鄂霍茨克洋闭合密切相关^[4], 构造异常复杂, 这种交接转换也保留在东亚深部结构的复杂性上. 因而, 这个地区成为检验全球性构造模型或理论的试金石.

长期以来, 人们常用Zhao等人^[5]获得的整个东南亚地区深达1300 km的P波层析成像来探讨华北克拉通破坏, 然而, 最近Liu等人^[6]得出东亚深部地幔过渡带的滞留板片形成时间不超过30 Ma, 这表明华北深部地幔过渡带的滞留板片的结构与华北克拉通峰期破坏可能无关. 中国东部在400~600 km深处, 存在宽阔的高速地幔异常体, 是俯冲消减的太平洋板块, 而不是古太平洋板块的俯冲板片在地幔过渡带的滞留, 现今所见的地幔过渡带是新近纪才出现, 只能用来探讨华北、华南浅部的构造响应. 现在的问题是: 介于地幔过渡带与岩石圈底部或Moho面之间的地幔楔深部结构是否可能是中生代期间形成的, 即大地幔楔及其上覆岩石圈底部的年龄结构如何, 新生代期间这个地幔楔发生过何种物质-能量的交换和结构改造.

同样, 东亚的西南部因新特提斯洋消亡和印度-欧亚板块碰撞, 于300 km深处形成高速异常体, 印度板块持续向北运动. 然而, 层析成像揭示, 喜马拉雅山以南的1000 km甚至更深的部位存在更多高速异常体, 板块重建表明, 这可能是随着燕山期冈瓦纳大陆不断分裂的一些板片在其北部与羌塘地块等相碰而消亡的新特提斯洋板片俯冲到下地幔形成的滞留板片^[5,7].

华北与华南地块自中生代以来正处于这两大动力系统深、浅部交错的大地构造位置(图1), 例如, 扬子地块东侧和西侧的600 km深处都存在高速异常体, 东侧深部的高速异常体与太平洋板块有关, 西侧深部的高速异常体与印度板块有关. 中国东部深层高速体于700 km深处消失, 但是马里亚纳群岛700 km以深还存在高速体^[5,6]. 然而, 这些都是新生代形成的深部结构^[6], 难以用来探索中生代问题, 因而深部大地幔楔及其邻近界面的年龄结构的探索需要地质、地球物理和地球化学等多学科的密切合作. 本文基于这种考虑, 侧重中生代古太平洋板块俯冲与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应, 探索现今大地幔楔的深部结构何种程度可用来约束中生代深部构造过程. 为此, 着重从地质角度, 开展多学科综合研究, 构建更深层次的深部结构与地表浅部地质记录之间的关

联, 进而反推中生代深部过程.

中生代深部地幔过程导致了地球浅表系统十分典型、复杂多样的壮观地质景象, 塑造了中生代的地球面貌. 以东亚区域为例, 如东亚超级汇聚^[3]、海陆分布格局巨变^[9]、短期集中式成矿^[10,11]、火山-岩浆大爆发^[12]、多幕伸展与挤压变形的时空交错与转换^[13-15]、多期地形大倒转^[9]、华北克拉通破坏^[16-19]、华南大陆再造^[20]、恐龙灭绝^[21]、白垩纪极端热事件^[22,23]、大洋缺氧事件等等^[24-26], 催生了大量原始创新成果和重大地质思想, 成果不断革新. 因此, 东亚-西太平洋地区是研究洋陆过渡带理想的天然实验室之一. 东亚洋陆过渡带作为一个完整的动力学子系统, 位于超级汇聚中心的东侧^[3], 其独特大地构造位置是不可替代的. 前人基于浅部构造解析, 主要进行了中、新生代东亚陆缘的构造、岩浆、成矿、成盆、成灾等深入综合研究^[3,9,27-29]. 本文强调这些洲际级构造域之间的构造转换对华北、华南中生代演化的控制与影响^[17,18,20]. 为此, 有必要基于东亚陆缘及邻区中生代构造、岩浆的详细研究基础上, 从东亚的深部岩石圈地幔背景来认识其浅部地壳独特的发生、发展规律, 从而理解其蕴含的全球大陆动力学和洋底动力学意义, 及其独有的资源、能源、环境与灾害效应.

1 东亚洋陆过渡带形成与古太平洋俯冲启动

东亚洋陆过渡带也称西太平洋洋陆过渡带^[30](图2), 总体是指(古)太平洋板块俯冲所波及的区域, 西界大体为大兴安岭-太行山-武陵山重力梯度带, 东界为日本-琉球-菲律宾俯冲带, 构造上横跨欧亚板块、印澳板块和太平洋板块. 东亚陆缘及周缘的前中生代大地构造历史认知, 有助于动态揭示其自然形成与统一过程, 特别需要系统分析特提斯洋和古太平洋的构造格局变迁. 东亚洋陆过渡带与南亚洋陆过渡带(后者大体相当于新特提斯构造带到莫克兰-巽他海沟的区域, 属新特提斯构造域)的两大动力系统共同作用在整个中国大陆核心地块, 对东亚和南亚的深部到地表系统起着重要的控制作用.

1.1 古太平洋俯冲启动: 晚三叠世NNE向变形约束

最新的地磁条带和板块重建^[31]表明, 约185 Ma(早侏罗世)左右, 太平洋板块始于现今南太平洋

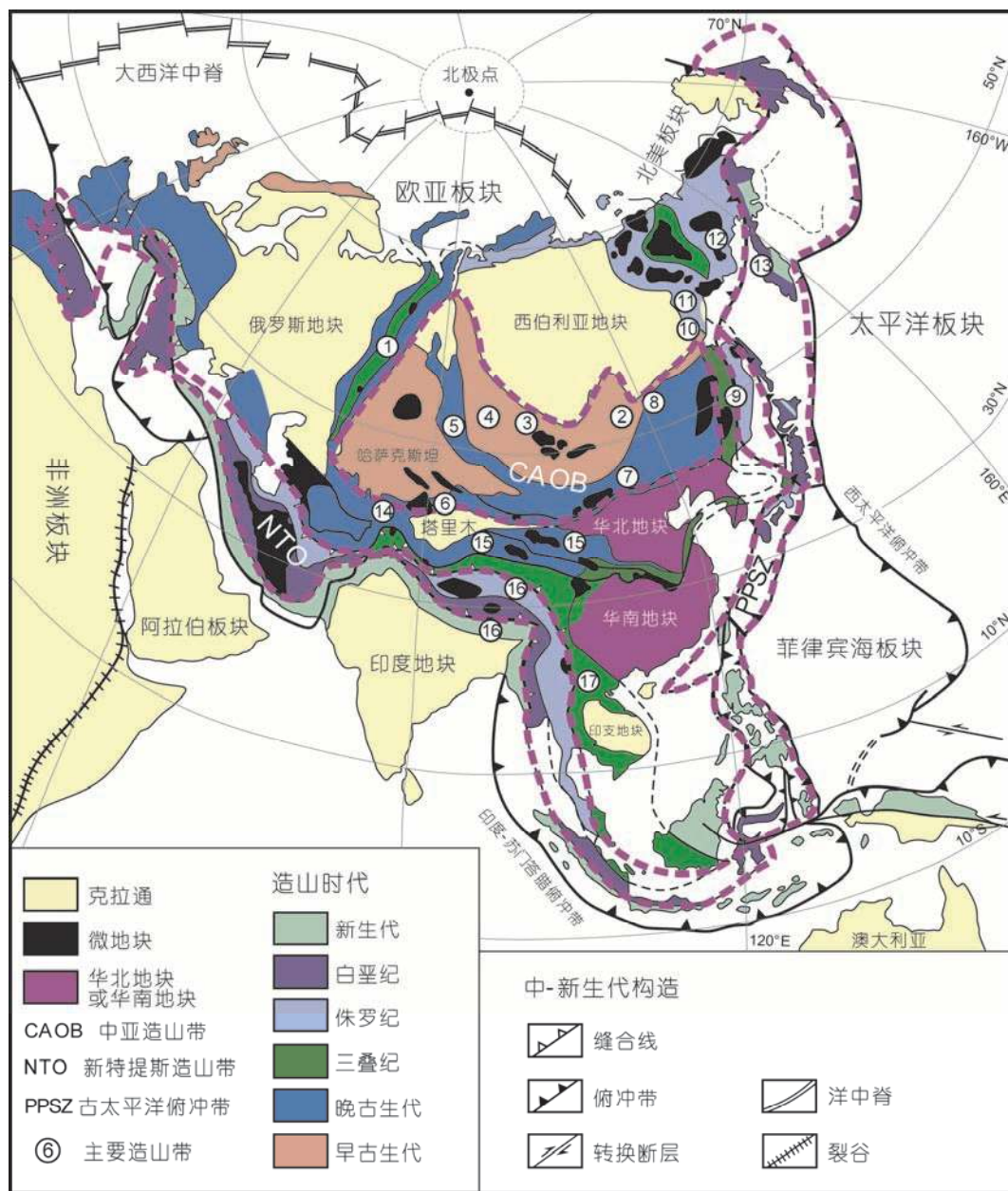


图1 亚洲构造格局及大汇聚背景(据文献[8]修改)。圈内造山带编号: 1, 乌拉尔; 2-6, 中亚; 其中, 2, 贝加尔-穆亚; 3, 叶尼赛-横贝加尔-北蒙古; 4, 阿尔泰-萨彦-蒙古西北; 5, 斋桑; 6, 天山; 7, 内蒙古南; 8, 蒙古-鄂霍次克; 9, 锡霍特-阿林; 10, 维尔霍扬茨克; 11, 鄂霍次克-楚科奇; 12, 阿玉南; 13, 勘察加西; 14, 帕米尔-兴都库什; 15, 昆仑-秦岭; 16, 青藏-喜马拉雅; 17, 华南。CAOB, 中亚造山带; NTO, 新特提斯造山带; PPSZ, 古太平洋俯冲带

Figure 1 Tectonic units of the Asian continent showing its tectonic setting of East Asian super-convergence (revised from Ref. [8]). 1, Uralian; 2-6, Central Asian; 2, Baikal-Muya; 3, Yenisey-Transbaikalia-North Mongolia; 4, Altay-Sayan-NW Mongolia; 5, Irtysh-Zaisan; 6, Tianshan; 7, South Inner Mongolia; 8, Mongol-Okhotsk; 9, Sikhote-Alin; 10, Verkhoyansk; 11, Okhotsk-Chukotka; 12, South Anyui; 13, West Kamchatka; 14, Pamir-Hindukush; 15, Kunlun-Qinling; 16, Tibet-Himalaya; 17, South China. CAOB, Central Asian Orogenic Belt; NTO, Neo-Tethyan Orogen; PPSZ, Paleo-Pacific Subduction Zone

位置的依泽奈崎、法拉隆和菲尼克斯板块间的三节点, 该三节点如何转变为三支洋中脊围限的三角形太平洋板块尚非常模糊。据太平洋海山的古地磁结

果, 自中生代以来太平洋板块北移了5000 km左右^[32]。因此, 当时作用于东亚陆缘的大洋板块并非太平洋板块, 而是笼统称之为的古太平洋板块。但是, 古太

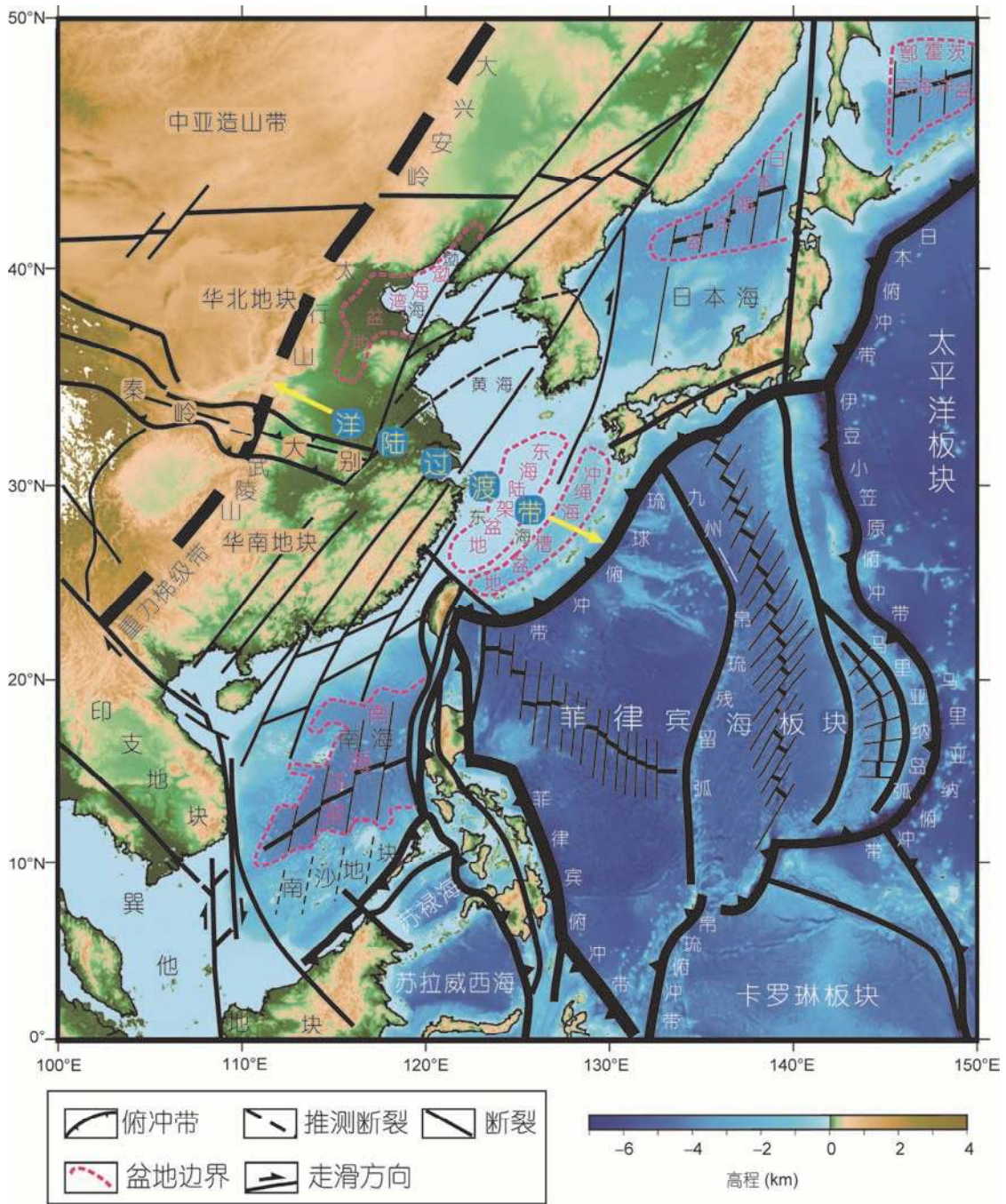


图2 西太平洋洋陆过渡带现今构造格局(据文献[30]) (高程数据源自BGI网站http://bgi.omp.obs-mip.fr)

Figure 2 Simplified present-day tectonic map of the West Pacific Ocean-Continent Connection Zone (after Ref. [30]) (Elevation data come from the BGI website http://bgi.omp.obs-mip.fr)

太平洋板块的具体含义,各家观点不一,如依泽奈崎(Izanagi)板块、库拉(Kula)板块、Pontus洋板块^[33]等等.值得注意的是,Hilde等人^[34]的库拉板块即依泽奈崎板块,而Müller等人^[31]和Seton等人^[35]的库拉板块却指70 Ma左右在北太平洋的一个小板块,因依泽

奈崎板块消亡过程中分割而独立出来;20 Ma左右,库拉板块完全俯冲消失在北美板块之下.期间,依泽奈崎板块北西向俯冲于东亚洋陆过渡带之下.这些重建差异取决于泛大洋内的洋内板块格局的差异重建^[33],可见,不同的洋内板块格局重建,可人为导致

洋陆过渡带不同的洋陆或壳幔相互作用的认识,如转换型陆缘、板片窗、洋中脊平行海沟俯冲等,然而这些重建很少接受洋陆过渡带具体地质事实的检验,这凸显洋陆过渡带研究的重要性和必要性。

万天丰^[36]对中国东部印支期变形进行了系统分析,发现褶皱轴总体是近EW走向展布。然而,通过仔细分析后发现,这些现今EW向褶皱的总体格局是一种静态、固定论观点下做出的结论。多数EW向褶皱都是印支早期变形的产物,结合古地磁结果动态复原后,其当时的原始走向还不一定都是近EW向。李三忠等人^[37]对华南地块内部湘中一带的构造解析表明,印支期华南经历了两幕褶皱作用,早期就可能是NNE走向,之后因为华南在此后70°的块体旋转,最终变成现今的近EW走向构造;早期NNE向褶皱正是古太平洋板块向南西西俯冲的产物,并且该俯冲导致印支晚期尚耦合的华南大陆顺时针70°转向后,该NNE向褶皱旋转为EW向褶皱,这个印支早期EW向褶皱之上又叠加了NNE向的一幕印支晚期褶皱,并被广泛的下侏罗统覆盖(可能为统一含煤盆地,因后期被燕山期强烈逆冲改造而现今零星分布),因此,华南地块构造方向的转变要早于华北,意味着古太平洋俯冲启动也可能在印支早期,直至东北地区出现于早侏罗世^[38,39],当然还有观点认为古太平洋板块在佳木斯地块的俯冲作用最早可能始于早二叠世,随后三叠纪-早侏罗世时,其俯冲影响到牡丹江断裂两侧,形成了南北向分布的岩浆岩带以及由黑龙江杂岩为代表的增生杂岩带^[40]。在下扬子地区,可见NNE向晚三叠世褶皱被下侏罗统覆盖^[41]。然而,在华北印支晚期主要是NNE走向逆冲推覆构造为主^[42]。根据变形判断,统一的东亚洋陆过渡带形成后,中国东部从南到北整体出现NWW向挤压收缩,应当还是晚三叠世,这可能对应古太平洋板块的整体NWW向俯冲的启动。特别是,最近在东北亚地区存在古太平洋俯冲的关键直接证据,如那丹哈达、日本增生杂岩带,也表明这个启动早于早侏罗世^[43-45]。

沟弧体系的东亚安第斯型大陆边缘(有人称为科迪勒拉型^[46];也有人认为不属于安第斯型^[47])始于印支晚期,不发育俯冲相关的安山-流纹岩系,但发育大量花岗岩基,自北向南如:吉林大兴沟(218 Ma)、胶东罗山岩体(230 Ma)、安徽九华山(230 Ma)、贵池铜山(石英闪长岩, 190 Ma)、铜陵(石英闪长岩, 193 Ma)、湖南骑田(223 Ma)、关帝庙(228 Ma)、贵东(194

Ma)、闽西南真峰顶(227 Ma)、白莲(195 Ma)、广西苗儿山(230~190 Ma)等,一直延到印支半岛^[48-52],活动陆缘成熟于燕山早期,发育两期构造-岩浆作用(180~140和140~100 Ma^[49])。燕山晚期弧背盆地(即弧后未出现新生洋壳的盆地)才由挤压转换为伸展断陷^[53]。然而,一些学者认为弧背盆地的伸展断陷性质不同于现今安第斯型陆缘弧后的挤压性盆地,进而否定东亚陆缘曾经存在安第斯型陆缘性质(转引文献^[54])。李三忠等人^[50,51]对中国东部岩浆岩时空分布分析发现,东亚安第斯型大陆边缘的华北丹东、郭家岭和华南发育大量170~160 Ma的大型花岗岩岩基,特别是浙闽沿海地带时代为170~130 Ma的安山岩、英安岩、流纹岩、花岗闪长岩^[52,55]都是典型的岛弧型岩浆岩。该岩浆岩带空间上总体平行复原后的古太平洋俯冲带(图3(a)),且早侏罗世弧后的盆地整体应当是压性挠曲盆地,故东亚陆缘此时应为典型安第斯型大陆岩浆弧^[52]。从变质变形角度分析,台湾大南澳群大理岩铅同位素年龄测得一个最老变质年龄为166 Ma,而在华北也存在大量154~145 Ma的构造-热事件年龄^[32]。此时,北部的蒙古-鄂霍茨克洋的最终封闭,导致蒙古-吉黑造山带内相对稳定的一些微地块东北向挤出(图3),并导致一些增生杂岩与兴安岭弧发生分离。通过复原因走滑而重复的部分萨哈林和日本侏罗纪俯冲增生杂岩,可得到长度等同于东亚陆缘同期大陆岩浆弧的一条单一俯冲增生杂岩带,即从华南福建弧,经华北东部、朝鲜半岛和大兴安岭,向北达Uda-Murgai弧^[56]。同样,华南造山带和秦岭-大别山造山带中、晚侏罗世收缩量恢复表明,华南宽阔陆内褶皱冲断带为100%的收缩量,与瑞士侏罗山的收缩量相当^[56],从而获得一条NNE向的安第斯型大陆边缘,存在时限应当是200~135 Ma之间。

Isozaki等人^[59]认为古太平洋板块俯冲启动在日本的最早记录可追溯到500 Ma,但是, Li等人^[60,61]认为这些记录可能与原特提斯洋有关,而非古太平洋记录。不管如何,众多研究揭示出东亚陆缘的复杂多期缝合带或大断裂连接方式,这些认识必然导致对其大地构造演化的不同认知。迄今,从岩相古地理再造结果分析,多数学者认为东亚陆缘在石炭纪-二叠纪为被动陆缘^[59]。新的研究资料还认为,古太平洋板块俯冲可能局部始于石炭纪末^[59],或早或中二叠世^[3,59,62-64],或早二叠世(280 Ma,石炭纪碳酸盐台地转换为早二叠世大陆弧^[40,63,64]),或三叠纪(250 Ma^[49]),

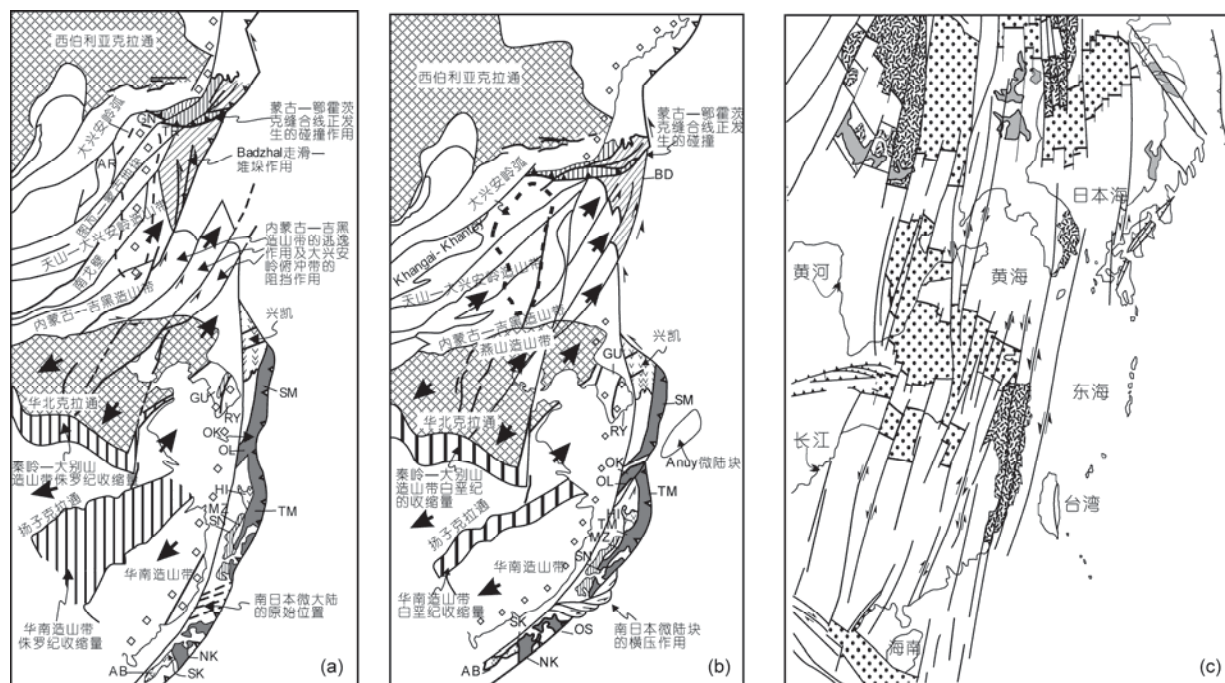


图3 东亚陆缘中生代构造演化重建。(a) 西太平洋构造带及其邻区侏罗纪初期的大地构造重建(据文献[44,56,57]综合);(b) 西太平洋构造带及其邻区侏罗纪-白垩纪转换时期的大地构造重建(据文献[44,56,57]略增改;箭头为三角形地块逃逸方向);(c) 新生代东亚洋陆过渡带右行走滑拉分盆地格局(转引文献[58])。AB, Abukuma变质杂岩; AR, Armuer地块; GN, 图瓦-蒙古地块中的Gonzha块体; GU, 京畿(Gyeonggi)地块; HI, 飞弹(Hida)变质杂岩(前寒武纪大陆壳和晚古生代岩浆弧); MZ, Maizuru俯冲-增生杂岩; NK, 北Kitakami俯冲-增生杂岩; OK(北), 鄂霍茨克(Okhotsk)地块; OK(南), Okrainsk块体; OL, Olginsk俯冲-增生杂岩; OS, Oshima俯冲-增生杂岩; RY, 岭南(Ryeongnam)地块; SK, 南Kitakami岩浆弧; SM, Samarka俯冲-增生杂岩; SN, Sangun和Akioshi俯冲-增生杂岩; TM, Tokoro俯冲-增生杂岩; TR, 内蒙古-吉黑造山带的图兰(Turan)块体

Figure 3 Meso-Cenozoic tectonic evolution of the East Asian continental margin. (a) Early Jurassic tectonic reconstruction of the West Pacific and neighboring area (revised after Refs. [44,56,57]); (b) Jurassic to Cretaceous tectonic reconstruction of the West Pacific and neighboring area (revised after Refs. [44,56,57]; arrows show escape motion senses of the triangular blocks); (c) Cenozoic pull-apart basins controlled by dextral strike slip faulting in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone (revised after Ref. [58]). AB, Abukuma metamorphic complex; AR, Armuer block; GN, Gonzha sub-block in the Tuva-Mongolian block; GU, Gyeonggi block; HI, Hida metamorphic complex (Late Paleozoic magmatic arc and Precambrian continental crust); MZ, Maizuru subduction-accretionary complex; NK, North Kitakami subduction-accretionary complex; OK(north), Okhotsk block; OK(south), Okrainsk block; OL, Olginsk subduction-accretionary complex; OS, Oshima subduction-accretionary complex; RY, Ryeongnam block; SK, South Kitakami magmatic arc; SM, Samarka subduction-accretionary complex; SN, Sangun and Akioshi subduction-accretionary complexes; TM, Tokoro subduction-accretionary complex; TR, Turan block in the inner Mongolian-Jilin-Heilongjiang Orogen

或整体统一的俯冲始于晚三叠世^[51,65], 或早侏罗世早期^[38,39]。

1.2 古太平洋俯冲带: 缝合线、构造转换与前进式俯冲

前人认为, 古太平洋最古老俯冲带一般可能出现在鄂霍茨克海、日本到中国东南沿海或附近海域一带。在这个NNE向地带的北东段, 可肯定的是日本发育的印支期双变质带, 内带为214~185 Ma的飞弹高温低压变质带, 对应于外带的三郡低温高压变质带, 曾被认为是古太平洋俯冲起始的地质标志。但是, 始于二叠纪的相关俯冲也可能与北侧古亚洲洋或南侧古特提斯洋关联, 特别是该带一系列证据表

明, 其与苏鲁-大别造山带具有可比性, 包括佳木斯-兴凯地块东侧早二叠世可能的西向俯冲, 更可能与古特提斯洋消亡有关^[42,66]。因此, 在日本北部出现的飞弹缝合线虽也是三叠纪, 但起始时间略早, 因而可能是古特提斯洋残余^[59]; 然而, 日本中南部的佛像缝合线(日本中央构造带)属于早侏罗世古太平洋板块俯冲的残余。

值得讨论的是日本东北部-萨哈林的构造格局, 有人认为是一个独立的鄂霍茨克板块^[67], 有人认为属北美板块^[68,69], 或有人认为是属中亚造山带东段或蒙古-鄂霍茨克洋的增生楔^[8,70]; 最近, Yang^[71]提出鄂霍茨克海是由海底高原堵塞海沟所致, 属来自古太平洋中的外来地体, 因而既不属于北美板块, 也不

属于欧亚板块。可见东亚陆缘东北段的板块格局更为复杂,迄今,最东北段的古太平洋俯冲启动时间也具有不确定性。

往南, Hilde等人^[34]坚信中国东南大陆的外缘(海域)应存在古太平洋的俯冲带。三叠纪-侏罗纪(印支晚期至燕山早期)古太平洋板块的俯冲带可能位于闽粤滨海断裂和东海陆架盆地西缘断裂,对应的古海沟称为闽浙-岭南海沟,实际就是东海西缘-东沙东缘深大断裂带,海沟的西侧为古火山弧。近来,张莉等人^[54]认为它只是一条中-新生代深大断裂,不具有缝合线性质。

耿秀山等人^[72]和刘光鼎^[73]也提出东海陆架盆地附近存在3条缝合线。第一条为与韩国湖南断裂相连的江山-绍兴缝合线,曾被认为是印支期缝合线,但其与古太平洋板块有关的认识已被否定,而是晋宁期缝合线^[53],晋宁期后华夏与扬子拼合并进入陆内演化阶段。第二条为冲绳海槽的西缘断裂-台湾纵谷断裂-日本中央构造线的连线为古太平洋板块俯冲带,特别是太鲁阁带位于台湾大南澳群西部,其二叠纪灰岩(后变质为大理岩)中发现Fusulinids和珊瑚化石,为亲华南属性,对照⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,其沉积时间则可能为280~310, 235~245和190~215 Ma三者之一,无论何者,依然表明古太平洋的最早俯冲时间最可能为晚三叠世。第三条为琼南缝合线与“滨海大断裂”(注意前人的滨海大断裂是一条南海北缘近东西走向的断裂,不同于此)相连,耿秀山等人^[72]和刘光鼎^[73]认为对应日本飞弹(Hida)缝合线,然而根据印支期同时代榴辉岩对比,飞弹带应对应苏鲁带。当然也有人认为琼南缝合线对应其北侧的长乐-南澳断裂带^[74],但长乐-南澳断裂带缺乏蛇绿岩带的其他众多标志,仅出露有串珠状基性-超基性岩体,因而可能只是一条类似于安德烈斯的大陆型转换断层;故本文认为吴根耀和矢野孝雄^[74]提出的长乐-南澳断裂带向东北延伸应与日本中央构造线断裂带相连也不太可能,两者不具有可比性。与此类似,最近,张莉等人^[54]又提出琼东南缝合线对应长乐-南澳断裂带西侧的丽水-海丰断裂带,是一条加里东期缝合线,与古太平洋俯冲无关。不过,有确定年龄的印支期缝合线是李献华等人^[62]提出的印支期琼南缝合线,张莉等人^[54]将琼南缝合线向海域延伸,对应于中、西沙海槽-海盆北缘缝合线,可能是印支地块与华南地块之间碰撞带的东延;但刘海龄等人^[75,76]将琼南缝合线延伸到南海

北部及台南,但在东海海域其去向不明。

再向南,张莉等人^[54]认为南海北部虽然也存在一条称为珠外-台湾海峡的缝合线,但是加里东期缝合线,这很让人难以理解为什么印支期琼南缝合线之南还存在一条更老的缝合线。但这进一步佐证了Li等人^[61]提出的华南地块加里东期整体与冈瓦纳拼合的观点。

无论持上述何种认识,东亚陆缘大地构造演化必然涉及这些可能与古太平洋板块俯冲关联的缝合线的讨论,基于这些认识,对其东亚陆缘响应也提出过很多观点,例如:地体构造、转换断层俯冲^[31,34,35]、涌动构造^[77]、板片窗^[78,79]、挤出构造^[3,56]、俯冲堵塞^[71,80]等种种构造模型和演化历程,但一致认为该陆缘印支晚期-燕山早期应属安第斯型大陆边缘。

在该安第斯型大陆边缘形成之前的印支中期,华北板块向南东楔入大华南板块^[61],中国东部统一大陆雏形基本形成,故统一的安第斯型大陆边缘应形成在此之后,按照古地理重建,此时该洋陆过渡带边界可能参差不齐。直至晚三叠世-侏罗纪,含放射虫的深海沉积物分布于西伯利亚东缘的维尔霍扬茨克、黑龙江那丹哈达岭、俄罗斯的锡霍特-阿林、日本西南美浓-丹波带、三波川和北秩父带、琉球、台湾三叠系玉里带、北巴拉望和西南婆罗洲一带,它们与灰岩、碎屑岩或者蛇纹岩、蓝片岩等组成俯冲杂岩,其中混杂有石炭系-二叠系、三叠系的海山岩块,乃至上侏罗统-下白垩统的浅变质混杂带基质,说明古太平洋板块的俯冲持续时间较长。再综合东亚陆缘的NNE向变形启动时间,本文倾向认为统一的安第斯型东亚陆缘起始于晚三叠世^[51]。中国华南或南岭山地^[20]和朝鲜半岛北部^[81]线状分布的花岗岩带侵入时代为225~184 Ma (三叠纪-侏罗纪),并表现出向西逐渐变年轻的趋势,以一些A型花岗岩或埃达克岩为特征,这些岩石类型不仅取决于仰冲板片的成熟度(华北、华南在印支期之前都经历了多期岩浆作用,成熟度较高),也可能说明早期可能以平板或低角度俯冲为特征,因为在华北和华南地块的浅表,于晚三叠世-早中侏罗世期间,主要表现为相对稳定的拗陷盆地形成,在华南南部与南海接壤的部分地区晚三叠世依然为海陆过渡相建造^[54,82-84]。

再者,从粤北、湘南、粤中、粤东、闽浙沿海、南海北部陆架等地的古生物组合和沉积建造表明,滨海拗陷中海陆交互相含煤碎屑岩系中不仅有大量华

南型植物, 还有大量海相菊石、鳃瓣类、双壳类化石, 这些生物具有太平洋区生物群特征, 且上三叠统-下侏罗统连片沉积^[54]. 所有这些地质事实正是古特提斯构造体制向古太平洋构造体制转换的具体体现, 因而, 古太平洋板块俯冲初始启动时期, 东亚陆缘不发育可靠的晚三叠世岛弧火山岩、弧后盆地沉积建造或相关蛇绿岩等, 这可能还说明此时古太平洋板块(200~150 Ma)向华北和华南的前进式俯冲挤压^[85,86](图4), 最终, 东亚陆缘标志成熟岛弧出现的大套钙碱性岩浆岩带出现在燕山期, 此时才出现高大的安第斯型海岸山脉. 但是, 迄今全球板块重建结果尚过于粗略, 我们最新的250~0 Ma的区域精细重建(未发表)与Yoshida^[85]和Matthews等人^[86]的俯冲带150~100 Ma向西前进和100 Ma之后才后撤(图4)不同, 表现出俯冲带250~150 Ma向西前进, 且185~175和165~145 Ma期间东亚洋陆过渡带发生左旋, 而170~165 Ma期间右旋; 145~135 Ma期间俯冲带位置基本保持稳定, 东亚大陆发生压扭性左旋运动(图3); 135~60 Ma俯冲带向东后撤, 且125~90 Ma期间东亚陆缘后撤同时伴随发生张扭性左旋走滑(图3); 60~50 Ma发生了短暂的俯冲前进, 可能与古太平洋-太平洋板块之间的洋中脊热俯冲有关; 50 Ma之后才出现Maruyama等人^[2]提到的俯冲带向东显著后撤, 随后分别于35和15 Ma左右东亚陆缘分别发生了短暂挤压, 对应东亚一系列盆地中的反转构造^[28]. 35 Ma之后, 现今沟-弧-盆体系下的西太

平洋型大陆边缘形成.

2 华北洋陆过渡带构造-岩浆作用迁移

2.1 华北洋陆过渡带变形

(i) 燕山早期西向渐新的逆冲推覆形变. 华北东部印支晚期-燕山早期表现为宽阔的挤压变形带. 从鲁西地块^[87]、渤海湾盆地到太行山地区, 广泛发育NE-NNE走向的逆冲断层和褶皱, 晚侏罗世挤压变形波及的范围最远到鄂尔多斯盆地东缘^[88]; 华北东部的宽阔变形带可远离板块俯冲带达1000 km以上, 虽可用板块构造远程效应给予解释, 按传统模型, 应由古太平洋板块低角度俯冲导致^[20].

而此时, 秦岭-大别造山带则表现为NWW走向的逆冲断层^[89], 大别发育大规模的垂向和侧向挤出^[90,91]. 但这期华北南缘的秦岭造山带NWW走向逆冲断裂与此时古太平洋板块的俯冲带走向正好垂直, 而不是平行, 因而按照力学原理两者是不相关的, 难以用古太平洋板块俯冲的单一动力因素给予整个华北及秦岭燕山期变形以合理解释.

华北东部和秦岭同期褶皱特征分别与各自的断裂体系特征具有一致性. 华北地块鲁西地区及以西到鄂尔多斯盆地东部发育的燕山期褶皱型式, 类似华南中部的雪峰山以西到华盖山断裂之间的^[92], 为NNE向隔槽-隔档褶皱, 且向西褶皱-逆冲作用逐渐变

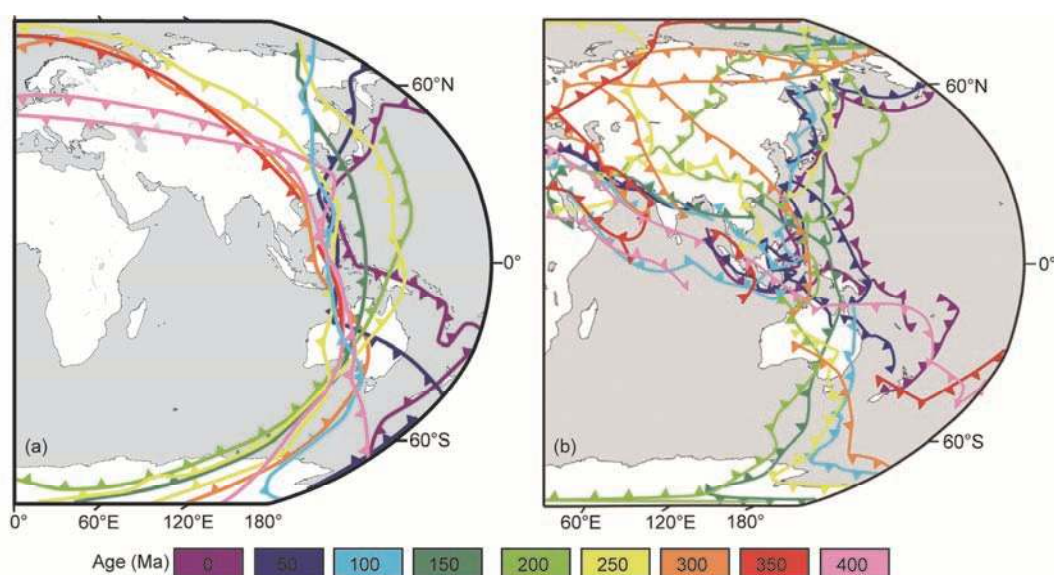


图4 东亚大汇聚期间(200~125 Ma)东亚三大俯冲带迁移过程. (a) 据文献[85]; (b) 据文献[86]

Figure 4 Migration of three subduction zones during the East Asian Superconvergence (200–150 Ma). (a) From Ref. [85]; (b) from Ref. [86]

新. 华北盆地(渤海湾盆地前身)西侧太行山地区燕山期类隔挡式褶皱^[93], 太古宙基底卷入隔挡式褶皱核部, 为厚皮构造, 与雪峰山的厚皮构造类似^[94]; 再向西, 最新一些剖面揭示, 鄂尔多斯盆地东部燕山期存在西向薄皮逆冲推覆, 等同于华蓥山地区只是盖层卷入的隔挡式褶皱, 皆为薄皮构造变形, 而华南的华蓥山断裂以西到四川盆地再无燕山期形变. 华北东部伴随这些褶皱-逆冲推覆作用则处于隆起状态, 盆地向西收缩, 晚侏罗世盆地缩小到鄂尔多斯东缘^[61,95,96].

华北南缘受秦岭造山带同期的边界效应控制, 表现为NWW走向褶皱-逆冲^[97]; 但仅用古太平洋俯冲这个单一因素还是难以说明其动力来源, 因而必须考虑: 此时松嫩、华北、华南和印支皆作为刚体还同时受到北部鄂霍茨克洋向南消减、南部新特提斯洋向北俯冲的远程效应^[3](图1), 即导致近南北向的挤压作用, 这种作用力可能导致上述4个刚性块体之间的力学上较软弱的造山带可进一步吸收大量应变, 而使得4个刚性块体之间发生南北向的收缩形变^[56].

(ii) 燕山中期(J_3-K_1)东向渐新的挤出型盆地群与俯冲前进及后撤. 华北及邻区燕山中期变形还表现为大规模盆地群、深大走滑断裂和变质核杂岩的形成. 晚侏罗世-早白垩世是东亚地区或陆缘大量走滑断层和变质核杂岩形成的时期, 大量深大走滑断层^[98,99]分割华北和华南地块及相邻地块为多个三角形的块体(图3), 块体之间复杂的陆内调整运动控制了燕山中期(J_3-K_1)陆内同期多类型小型盆地的发育^[3], 然而燕山中期这种复杂的挤出、弥散性局部伸展始终处于周边区域性NW-SE向挤压背景之下^[98,100], 特别是古太平洋俯冲的NW-SE向挤压下^[98], 东亚燕山中期NE向切割岩石圈的深大走滑断裂起始活动时间大体相同, 主体活动时间介于160~100 Ma; 但华北和华南略有差别, 华北深大走滑断裂自东向西约200~135 Ma之间逐渐变年轻^[101-107], 华南深大走滑断裂自东向西约160~135 Ma之间逐渐变年轻^[108]. 相反, 断裂停止活动或压扭性向张扭性转换的时间(125~100 Ma)则具有由西往东逐渐变新的趋势, 例如, 嫩江-八里罕断裂带及其北延(控制铅矿始于155~148 Ma^[109]; 压扭134~113 Ma, 张性112 Ma^[103]; 伸展144~147 Ma^[104]), 郟庐断裂带(大别段压扭可始于200 Ma, 主体介于160~120 Ma^[101], 冷却于132~125 Ma^[102]; 左旋走滑143~137 Ma, 冷却于120~110 Ma^[106]; 或依兰-伊通段压扭介于160~126 Ma^[105]), 牟平-即墨断裂带(岩体

年龄约束压扭介于160~150 Ma, 张扭123~106 Ma^[107]), 长乐~南澳断裂带(压扭149~137 Ma, 张扭小于100 Ma^[108])等. 这些宏观差异尽管还需要更多数据支持, 但就这些数据结合整个中国东部燕山早期盆地隆升-沉降演变和迁移的东隆西拗规律、燕山晚期锆石/磷灰石裂变径迹揭示的冷却起始时间西早东晚(吕梁山138 Ma^[110]; 大兴安岭120~90 Ma^[111]; 桦甸128~111 Ma^[112]; 南太行100~50 Ma^[113]; 下扬子110~90 Ma^[114]; 宁芜-庐纵106~79 Ma^[115]; 胶北110 Ma^[116]; 北黄海100~80 Ma^[117]; 江西相山100~75 Ma^[118]; 闽西南里田91~57 Ma^[119]), 可以说明, 东亚洋陆过渡带200~135 Ma之间可能发生了向西的构造递进过程^[85,86], 随后125~100 Ma表现出由西往东逐渐变新的断裂活动和冷却趋势, 后者可能意味古太平洋板块的俯冲后撤^[27,28], 进而导致上述西侧先冷却, 东侧晚冷却的过程.

(iii) 燕山中期(J_3-K_1)变质核杂岩与挤出型盆地群耦合关系. 135~125 Ma或135~110 Ma之间则是广泛分布的变质核杂岩形成时期^[13,14,120,121](图5), 且变质核杂岩分布远远超出了破坏的华北克拉通范围, 但其分布和华南变质核杂岩(140~120 Ma)分布类似^[122], 主要受先存断裂的控制. 这些变质核杂岩不仅具有形成的同时性, 而且具有动力学上伸展方向的一致性, 且运动学上拆离滑脱方向具有某种反对称性或对称性^[14], 可见华北克拉通破坏不是变质核杂岩形成的动力机制, 或变质核杂岩也不是华北克拉通破坏的结果或效应, 因为克拉通破坏区域之外也发育变质核杂岩. 结合粗略的图4和5, 可见东亚地区南部(青藏地区)俯冲边界150~100 Ma期间基本稳定; 东部(西太平洋)俯冲带150~100 Ma还在西进^[85,86], 不可能出现板块边界的应力松弛, 而处于一种时空上复杂的压扭向张扭的转换阶段, 其东界100 Ma才开始发生后撤, 虽可以引起NW向的应力松弛并导致弥散性伸展, 但这个时间已经是晚于135~125 Ma的变质核杂岩形成时代. 特别是, 板块伸展分离过程或俯冲后撤与挤压过程不同, 理论上很难导致远程效应, 最终必然应变集中化而局限在一个非常狭窄的区域发生裂解, 直到破裂而出现洋壳. 宽达几千千米的大尺度伸展拆离^[13]由区域伸展作用导致也几乎不可能发生, 因为伸展一般极易导致地壳或岩石圈应变局部化, 从而不会影响太大区域. 因此, 如此广泛的“伸展型”变质核杂岩分布(超过3500 km宽)难以用板块

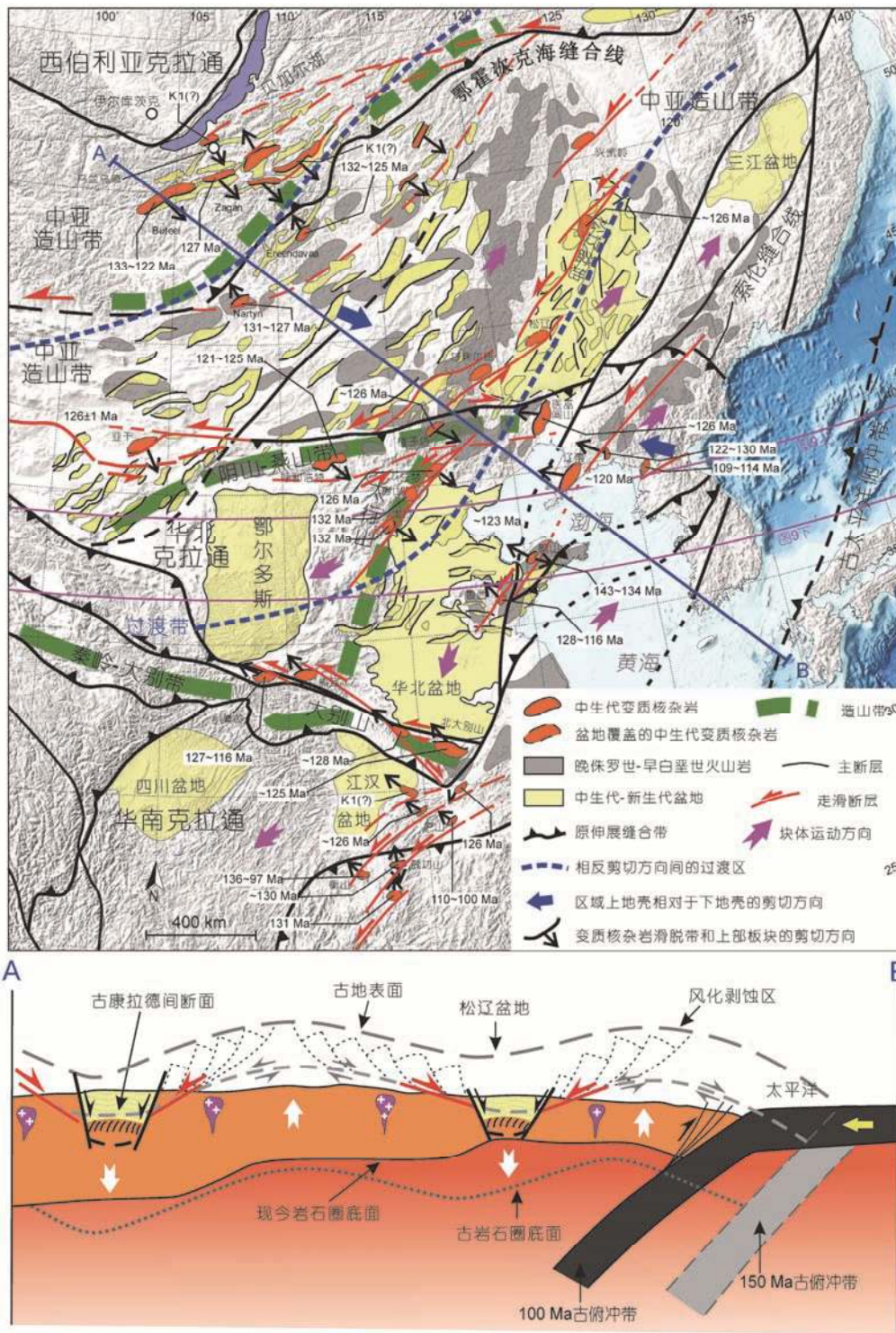


图5 东亚变质核杂岩分布、形成时代(a)和岩石圈尺度褶皱与挤出机制(b) (据文献[13,14,120,121]综合)
 Figure 5 Distribution and ages of metamorphic core complexes (a) and lithosphere-scale folding and tectonic extrusion (b) (revised from Refs. [13,14,120,121])

构造远程效应解释(一般板缘的陆内远程效应只用来解释大范围挤压形变). 此外, 上述这些特征形成的

机制很难用如此大区域的深部大规模拆沉、底侵动力过程来解释, 因为迄今所知拆沉、底侵都是小尺度和

短期的深部地质过程;也很难用蒙古高原或华北高原的范围有限的垮塌或大陆蠕散来解决,因为在这些高原之外依然存在同期变质核杂岩.综合上述模型讨论,本文认为,变质核杂岩成因必然归为大陆岩石圈内部某种独有机制,这个机制必须具备两个特征:大范围和短周期.

图4显示150~100 Ma期间,古太平洋板块快速向西前进^[85,86],岩石圈也发生了减薄,平均厚度降为100 km左右,软流圈对流引起动力地形变化,同时这个厚度的刚性大陆岩石圈可能在相对长期地史的短时间内会表现为弹性行为,出现长波长的动力地形,也即是岩石圈发生极宽缓褶皱^[123,124],且岩石圈内的各个分界面(如Moho面、中地壳的康拉德面、岩石圈底界面等)都会同步发生协调或不协调的褶皱作用^[125],但由于地壳和岩石圈地幔强度不同,可能会出现上部地壳的波长短于岩石圈地幔的波长^[126],因而也可能出现上下不协调、非线性褶皱作用,在岩石圈尺度褶皱的挠曲下凹部位早期会出现脆性破裂,出现对倾正断控制的断陷盆地,后期转而为挠曲盆地,如松辽盆地,而岩石圈尺度背斜核部也会发生反向的犁式破裂(图5).作为具有分层结构的地壳或岩石圈,像多层叠置的地层发生褶皱一样,层间会发生相对滑动,即中地壳最易发生滑脱.结合抬升-剥蚀-埋藏历史和地壳的均衡理论,这样不仅可以很好解释大区域的挤压背景^[127,128],而且可以合理解释浅部岩石圈尺度局部伸展和伸展的空间分布规律,以及变质核杂岩伸展滑脱方向的反对称性、同时性(135~125 Ma)和区域挤压作用同向性(NW向)(图5).至于深部Moho面的褶皱、错断和调整与形成机制可能是长波长背斜部位的浅表伸展滑脱或风化剥蚀以及更深部拆沉^[124,129,130]的联合效应,导致Moho面最终发生调整,盆地下部会上凸、变质核杂岩下部的Moho面会下凹,未及调整的区域则表现为盆地下部Moho面下凹.最终形成一种平面和剖面上都为透镜状的结构,这种结构的本质实际是岩石圈尺度的变形分解作用(图5)在Moho面调整过程中的效应.当然,这种基于构造变形原理的模型还需要未来数值模拟的检验.

与变质核杂岩伴生发育有同期盆地群,但这些盆地群起始到结束的时间跨度比变质核杂岩的时间跨度更大,一般变质核杂岩形成时间范围处于周边盆地群的成盆期中期.盆地群主要表现为早期弥散

性断陷盆地,中期整体挠曲盆地,晚期断陷演化整体向东迁移,且受深大压扭性或张扭性走滑断裂控制^[99].郟庐断裂带和兰考-聊城断裂带、牟平-即墨断裂带使得华北地块东部分为两个以郟庐为界互为倒置的三角微地块^[98,131],即东三角微地块和西三角微地块(图3(b)和图5).其中,东三角微地块明显向NE向挤出^[98,131],青山期前,其西北界为左行沂沭断裂,其东南界五莲-荣成断裂或牟平-即墨断裂为右行^[107,132];王氏期后,它们皆发生反向运动^[131],出现盆内反转.结合其南侧紧邻的下扬子沿江地区同期挤压构造^[133]表明,郟庐断裂带以东的东三角微块体处于南部扬子地块的挤压作用下,而且,苏鲁造山带与大别造山带显著被分割.因为早白垩世早期东三角微块体的东北边缘仍为自由边界(图3(b)),而西三角微块体此时在左行剪切作用下发生旋转并南移(图5)^[98].在华北东部的这些近同期的盆地既有伸展断陷(渤海湾)、走滑拉分(郟庐),又有挤压挠曲(合肥)等盆地类型,性质视其处于三角形块体的部位而定^[98,132].可见,在挤压逃逸地块的尾部常出现垂直挤出方向的断陷盆地,而在三角形块体两侧走滑断裂部位往往出现张扭或压扭性拉分盆地.华北邻区的下扬子系列盆地^[134]和中扬子江汉盆地^[135]与此类似.实际上成盆期峰期的变质核杂岩也大体分布在这些深大断裂的附近,在三角形块体挤出方向的前缘则出现垂直挤出方向的挠曲盆地,如大别山根带北大别杂岩向北逆冲在晓天盆地下白垩统之上,合肥盆地晚白垩世才出现断陷盆地叠加^[3,97].

至早白垩世中期,东北的勃利等盆地反转为陆相^[136],可能反映东三角块北缘边界受约束,走滑达顶峰,且逃逸块体前缘逆冲抬起.古地磁资料^[137]也表明,晚白垩世开始,敦化-密山断裂两侧古地理位置皆无明显变化,东三角微块体北缘边界受约束引起的挤压至早白垩世晚期仍在持续,形成大量东西走向的逆断层.所以,中国东部高原大约形成于晚侏罗世-早白垩世,它是在能量最小的浅构造层的逃逸不可能发生的情况下,以向上推隆的形式形成的.这从埃达克岩等的研究结果圈定的中国东部高原范围基本相同^[138],当然这也可能只是一个宽阔的海岸山脉^[9,139].

(iv) 燕山晚期(K₂)东向渐新断陷盆地的西侧反转与东侧俯冲后撤.岩浆岩的大量研究表明,至晚白垩世早期,东亚地区的伸展裂陷空间上集中在华

北克拉通的东部地块,其深部岩石圈地幔或下地壳拆沉、热-化学侵蚀早已在前期达到顶峰^[16],导致浅部构造层发生局部伸展塌陷和火山喷发(图5);在华南的同期盆地也集中到靠近俯冲带的不远范围,这似乎与图4展示的100 Ma以来开始的俯冲带向东后撤相关^[27,28]。

直至早白垩世晚期,华北北部邻区的松辽盆地表现为热沉降碟状盆地,沉积中心和沉积层序依次向北西方向迁移^[140],和东侧早白垩世城子河组-穆棱组时期为统一盆地的大三江盆地一样^[136,140~142],晚白垩世晚期皆表现为压扭性反转盆地^[140,142]。但是,大三江盆地相对松辽盆地构造反转略早,为早白垩世末期^[142],且其东、西两侧皆出现了一系列陡倾的岩层,为冲断褶皱带前缘^[143],并形成狭窄的粗碎屑沉积为特征^[142]。其华北东部郯庐断裂以东的晚白垩世盆地表现为收缩挤压褶皱带,而胶莱盆地表现为南北向拗陷盆地,湖盆收缩^[131]。这些盆地反转机制似乎与东海陆架盆地晚白垩世的盆地裂解有关,即可能俯冲带后撤导致的盆地裂解中心向东迁移^[27,28],而这种东侧的裂解作用又导致裂解区的西侧发生了挤压反转。综合表明,晚白垩世古太平洋板块俯冲对这些盆地收缩仍应起主导作用,但主导的方式不是直接挤压作用于内陆盆地,而是通过弧后伸展裂解来推动内陆盆地反转。然而,与Ratschbacher等人^[144]认为晚白垩世-古近纪郯庐断裂虽无明显位移仅处于伸展背景不同,本文认为,燕山晚期中国东部总体是张扭性背景下,不是单纯的伸展,且这种张扭作用,正如前文所述具有整体向东变年轻的总体规律。

(v) 燕山期挤压与伸展构造的交替性与深浅部构造耦合。华北地块东部或邻区最为显著的变形特征之一就是广泛发育的变质核杂岩和盆地群。从远离古太平洋俯冲带的亚干变质核杂岩到郯庐以东的辽南,要用统一的区域性伸展事件来解释如此宽阔的伸展范围异常困难,尽管独立的变质核杂岩运动学解析结果都揭示出同时的NW向或SE向伸展滑脱,但并不一定是NW-SE向区域性伸展所致。如果伸展作用能波及如此宽大的区域,应当出现了大量的同期断陷盆地,甚至不是一个宽裂谷模式可简单概括的,更不能在东亚其他地区出现同期的挤压挠曲盆地。实际上,不仅没有看到这样的宽达3500 km的裂谷盆地群出现,反而在这个时期的同期盆地类型具有最为显著的多变性。另一个事实就是,这些变质核

杂岩形成时间大体也存在一个向东变新的趋势(图5),与盆地向东变新的趋势大体一致^[27,28]。再者,单个地区分析,局部变质核杂岩和相关伸展盆地的形成代表伸展事件,同一地区此伸展事件之前必然发生过同方向的挤压变形。华北东部这种同方向的先挤压与后伸展作用,在空间上具有自西向东跃迁,总体变年轻的趋势。但这个空间上的规律以往被总结为全区伸展与挤压的时间上交替出现,而实际可能是东侧伸展同时,西侧在挤压;或者压扭向张扭的转换,而不论是压扭还是张扭,总体都是处于挤压背景之下,压扭向张扭的转变似乎与周邻板块运动转向具有某种联系^[145,146]。因而,伸展与挤压交替的长期论争是时空交错着混乱统计的人为有序结果,不能将其无限放大到整个东亚地区,并认为整个东亚地区必然经历了伸展与挤压的交替性或周期性。

同方向的挤压与伸展作用,在空间上整体具有自西向东跃迁的趋势,可能有俯冲松弛与后撤的影响,但浅部多个动力系统可导致力学上较弱的造山带发生岩石圈挤压和增厚,最后深部发生局部的拆沉,导致岩石圈浅部局部伸展;同方向的挤压与伸展作用具有整体自西向东跃迁的规律,且相邻空间的同时性收缩与伸展应变互补,因而可能与深部拆沉过程整体向东变浅的跃迁有关。

2.2 华北洋陆过渡带岩浆作用

华北东部印支期岩浆岩分布有限,主要见于华北克拉通的北缘和东北部^[147],其他地区不见,但是朝鲜印支期花岗岩发育(图6)。侏罗纪和白垩纪两期岩浆岩在华北和朝鲜都比较普遍^[149]。三叠纪和侏罗纪以花岗岩为主,少量辉长岩,很少火山岩;早白垩世晚期(~110 Ma)多为花岗岩,晚白垩世(90~60 Ma)以火山岩主^[81]。

(i) 印支期西向渐新的岩浆岩带迁移。华北克拉通北缘印支早期(二叠纪末-早三叠世)岩浆活动主要受中亚造山带制约,东西向分布^[147],可能与古亚洲洋俯冲相关;但印支晚期的岩浆岩(A型花岗岩)主要分布在辽东地区,与华北克拉通初始破坏和拆沉相关^[149],其空间分布上可能对应层析成像(图7和8(b))揭示的第一阶段拆沉体的东侧(200~250 Ma)。深部拆沉启动之后,燕山早期可能持续向西拓展(150~190 Ma)。但是,这阶段拆沉可能中断,这个中断事件对应华北存在一个岩浆间歇期(210~190 Ma^[152])。

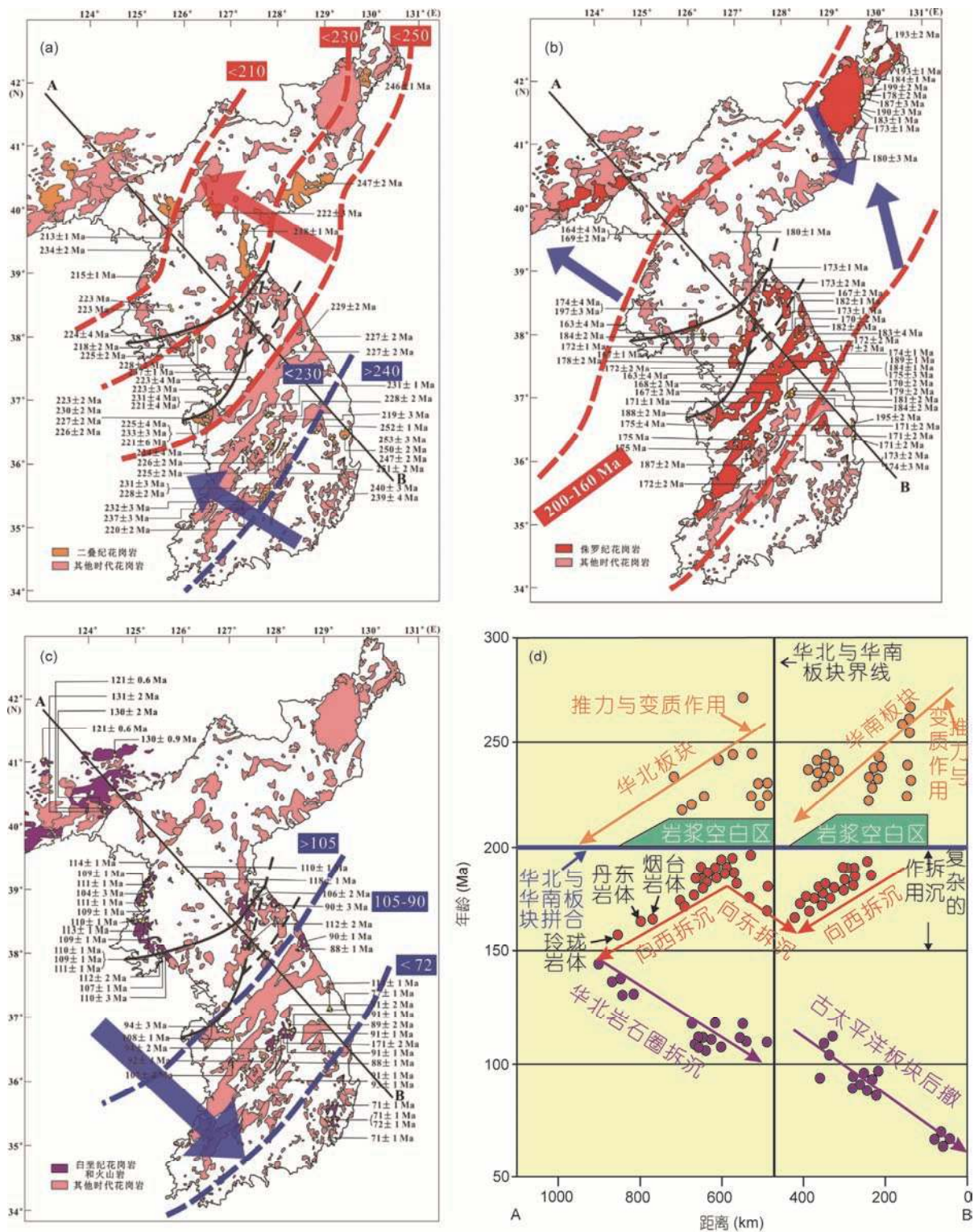


图6 华北及东部邻区岩浆作用时空迁移(数据来源文献[148]; 解释和年代剖面属本文). (a) 250~200 Ma 花岗岩年龄分带; (b) 200~160 Ma 花岗岩年龄分带; (c) 125~70 Ma 花岗岩年龄分带; (d) 沿剖面AB的 250~70 Ma 花岗岩年龄统计与解释

Figure 6 Temporal and spatial migration of magmatism in North China and its eastern adjacent area (age data from Ref. [148]; the explanation of age profiles seen in the text). (a) Age zonation of 250~200 Ma of granitic plutons; (b) age zonation of 200~148 Ma of granitic plutons; (c) age zonation of 125~70 Ma of granitic plutons; (d) statistics and interpretations for ages of 250~70 Ma of granitic plutons along the Profile AB

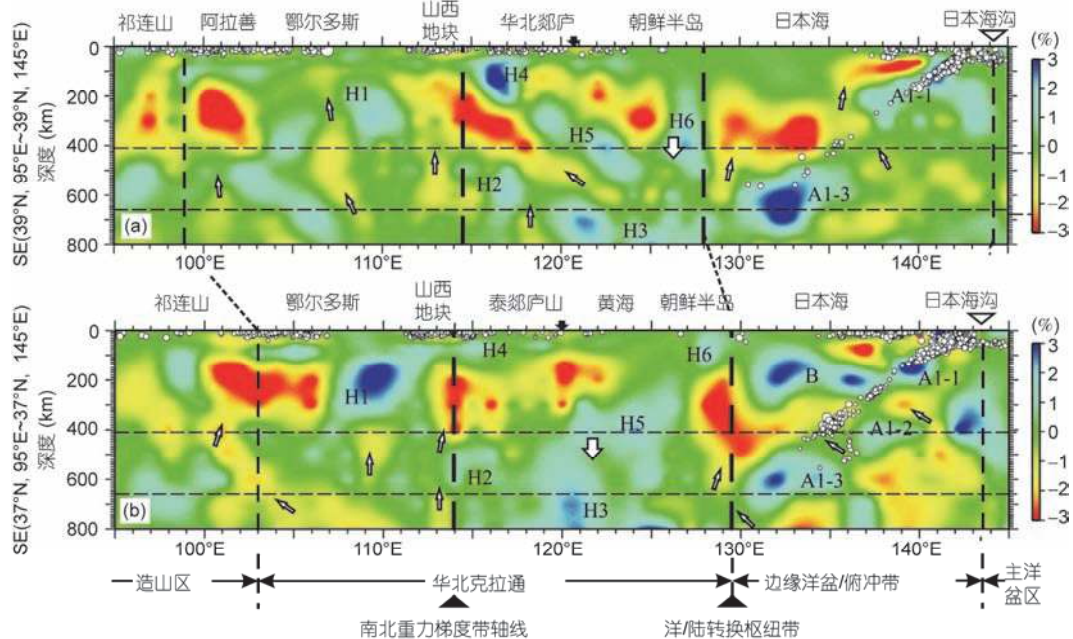


图7 华北及东部邻区东西向层析成像剖面(据文献[150])。红蓝色分别代表一维速度初始模型的负、正扰动;白色圆圈为距离剖面50 km内的地震震中位置的投影;箭头代表速度异常体的运动方向,速度剖面中的分割线代表不同构造单元的地表分界位置(详见文中说明)。A1-1~A1-3代表西太平洋俯冲板片高速体;H1~H6表示与岩石圈拆沉有关的高速体。上、下层析剖面位置分别对应39°和37°N(图5)

Figure 7 Two seismic tomographic profiles across North China and its eastern adjacent area (after Ref. [150]). Red and blue represent the initial negative and positive disturbance in the 1D velocity model, respectively; white circle is the location projection of the earthquake epicenters with 50 km range in distance of the profile; the arrows represent the direction of motion of the velocity anomalies, the dividing lines represent the surface boundary locations of different tectonic units in velocity profiles. The delamination-related high speed (as detailed in this paper A1-1~A1-3) is on behalf of the high speed Western Pacific subducted slabs; H1~H6 are related to lithosphere-delaminated high speeds. The positions of the upper and lower sections correspond to 39° and 37°N (seen in Figure 5)

朝鲜三叠纪松林期(Songnim)即印支期(图6), 该期花岗岩遍布于整个朝鲜半岛, 但朝鲜半岛南部和北部岩浆成因的触发机制可能大不相同。朝鲜半岛北部具有向西由250 Ma渐新到210 Ma的趋势(图8(a)), 可能与华北俯冲到大华南地块后向西的深部拆沉相关^[42], 且同期拆沉的是大陆岩石圈(图8); 而朝鲜半岛南部向西的渐新年龄趋势与华南印支期花岗岩年龄西向趋势一致, 与古太平洋板片平板俯冲的向西拓展相关^[20], 且其拆沉发生在燕山早期, 发生拆沉的对象是大洋岩石圈^[20]。朝鲜半岛的主要岩石类型是高钾花岗岩-钙碱性花岗岩, 少量碱性岩和辉长岩, 锆石同位素年龄在213~253 Ma, 峰值是220~230 Ma^[81]。朝鲜半岛南部的三叠纪花岗岩经常有前寒武纪2500~2800和2000~1700 Ma年龄的继承锆石, 尽管其地球化学性质与华北张家口和京北地区三叠纪花岗岩和碱性岩相近^[153,154], 其继承锆石年龄在邻近的扬子地块或华夏地块的花岗岩中也常见^[90,155,156], 但也可能与胶辽吉地区前寒武纪事件时代相同^[61], 结合Yu

等人^[157]发现的下扬子地区新生代玄武岩中麻粒岩捕虏体来自华北的证据, Liu等人^[158,159]发现的胶辽吉带岩片卷入苏鲁带印支期变质变形的事实, 都表明也可能是华北克拉通东部地块向大华南地块的朝鲜半岛深部俯冲所致^[42]。朝鲜狼林地块南部出露锆石U-Pb 年龄为224~234 Ma的正长岩-辉长岩体, 源于富集岩石圈地幔^[160]。根据翟国国^[81]对朝鲜半岛岩浆岩年代学统计结果, 可以发现韩国印支期花岗岩也具有由东向西渐新的趋势(图6(a)和(d)), 这与华南东部的同时代花岗岩的年龄递变规律一致^[20]。

(ii) 燕山早期相向渐新的岩浆岩带迁移与深部反向(对开门式)拆沉。燕山早期, 华北与大华南地块已经实现完全的拼合和一体化, 侏罗纪岩浆岩在华北和华南具有某种一致性, 绝大多数是各类花岗岩, 且多数属于高钾钙碱性花岗岩, 具有准铝质到过铝质地球化学性质^[81]。这些花岗岩普遍叶理发育, 在辽东至胶东可见丹东、郭家岭、招远等片麻状花岗岩发育, 可能与燕山早期中侏罗世或大宝(Daebo)期

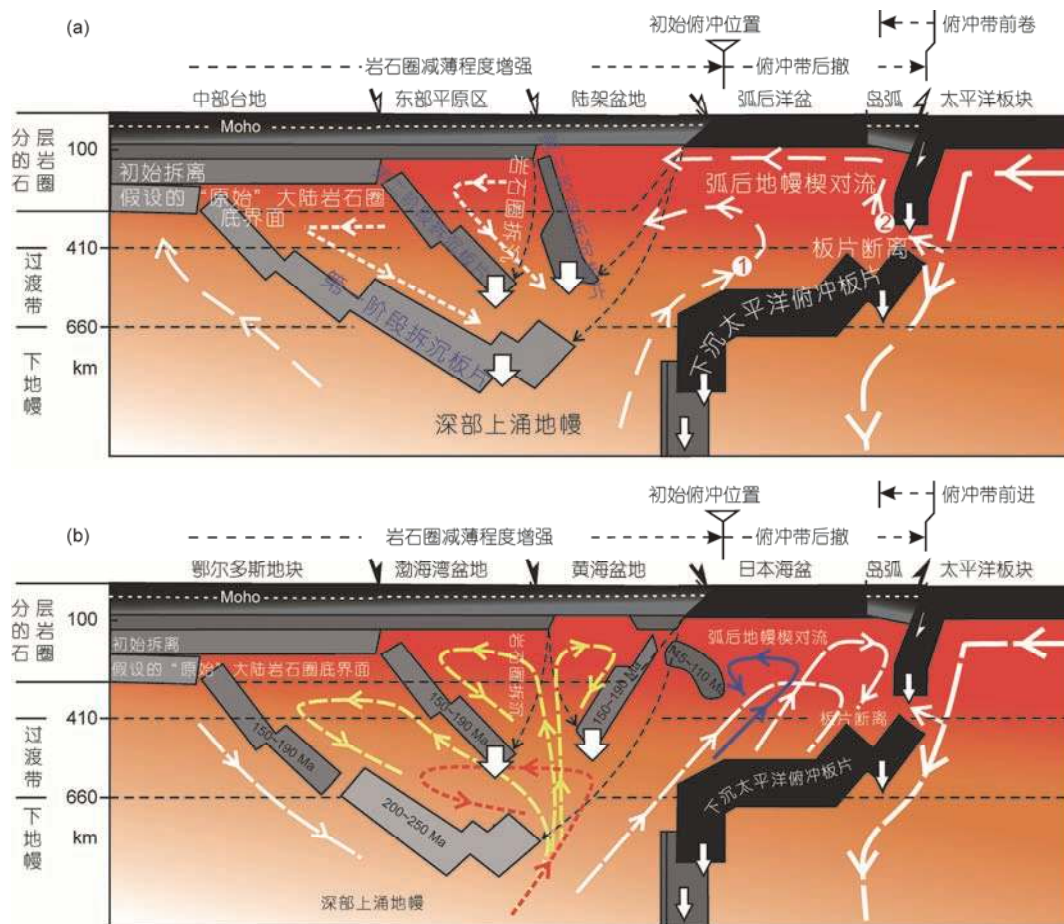


图 8 新生代太平洋板块俯冲与华北克拉通及邻区中生代岩石圈拆沉减薄模型及大地幔楔年龄结构解释示意图((a), 解释据文献[150])和太平洋板块俯冲与中生代华北克拉通岩石圈拆沉减薄模型及年代学、动力学解释((b)为本文结合岩石学、年代学的新解释, 大地幔楔中红色流线代表印支晚期的地幔楔对流环, 黄色为燕山早中期对流环, 蓝色为燕山晚期对流环, 白色为新生代对流环, 构成现今的小地幔楔, 标注的时限为拆沉作用发生的时间, 不是被拆沉对象的形成时间)

Figure 8 Mesozoic delamination and thinning model of lithosphere of the North China Craton, age structure of big mantle wedge and the relation to the Cenozoic Pacific Plate subduction ((a) is after Ref. [150], and delamination and thinning model of Mesozoic lithosphere of the North China Craton driven by the Pacific Plate subduction, including explanation of age zonation ((b) is explained based on geochronological and petrological data. The red flow line represents the Indosinian mantle convection, the yellow represents the Early-Middle Yanshanian mantle convection and the blue represents the Late Yanshanian mantle convection, the white represents the Cenozoic mantle convection as small mantle wedge. Timespans are time duration of delamination rather than formation time of the delaminated objects)

韧性逆冲作用相关^[148,161]。在朝鲜代表性韧性剪切带是NNE向的Chugaryong断裂带和韩国湖南断裂带, 两者基本控制这些岩体的NNE向分带。

侏罗纪火山岩在朝鲜半岛局部出露在太白山盆地, 酸性火山岩年龄为186~187 Ma^[162], 含有~1.9 Ga的残余锆石。侏罗纪花岗岩大致分为黑云花岗岩和花岗闪长岩, 前者表现为大面积岩基, 后者多为岩枝和岩脉, 年龄多在184~167 Ma, 残留锆石的年龄是约1.8~2.5 Ga, 显示强烈下地壳重熔特征, 被认为是印支期后造山作用的结果。华北克拉通的侏罗纪花岗岩年龄多在165~145 Ma^[163], 从年龄上可见, 朝鲜

半岛花岗岩相对胶辽吉地区的发育较早。因朝鲜半岛东北部的侏罗纪花岗岩与中国东北的侏罗纪花岗岩连成一体, 因此张艳斌等人^[164]推测与中亚造山带的演化直接相关。但是, 具体分析朝鲜半岛岩浆岩年龄空间迁移可见, 190~150 Ma花岗岩相向朝一个中心地带变新的趋势(图6(b)), 表明不太可能仅受中亚造山带演化控制, 特别是其展布的走向与古太平洋俯冲带走向一致, 因而很可能不受中亚造山带演化控制。这种年龄分带与变迁规律非常类似Li等人^[20]总结的华南此时的特征, 更可能说明华北克拉通东部岩浆作用可能是190~150 Ma深部反向拆沉过程的

反映(图8(b)).

(iii) 燕山中-晚期东向渐新的岩浆岩带与俯冲后撤. 华北东部燕山中期岩浆活动向内陆拓展, 一直影响到太行山西侧, 但东北地区燕山中期向晚期转变时的岩浆作用具有显著的向东迁移规律^[165], 且华北东部至燕山晚期的岩浆作用才表现出同样东撤趋势, 同期火山作用因而在华北也不明显(图6).

朝鲜半岛广泛发育白垩纪花岗岩(图6(c)), 但火山岩仅分布在庆尚盆地. 该花岗岩锆石年龄变化在114~92和~110 Ma为峰值, 多是亚碱性, 从准铝质到过铝质壳熔花岗岩, 这些壳熔花岗岩普遍含有~1.8~2.6 Ga的残留锆石. 从这些花岗岩时空迁移规律可见向东变年轻的趋势显著(图6(c)和(d)), 这可能与100 Ma以后古太平洋俯冲带向东的显著后撤相关. 这些花岗岩矿化形成Au-Ag矿, 成矿年龄大约为100~70 Ma^[166], 与局部分带内挤压向伸展环境的转变相关. 华北克拉通与朝鲜半岛白垩纪花岗岩的成矿有两个明显差别: (1) 后者形成年龄明确要晚10~20 Ma; (2) 前者成矿以Au矿为特征, 局部为Mo矿, 成矿时代是130~115 Ma; 后者是Au-Ag矿为特征, 成矿时代晚于100 Ma^[165]. 由此可见, 成矿时代也显著地向东变年轻.

韩国庆尚盆地是一个火山-沉积盆地, 上部岩组主要为火山岩, 包括玄武岩、粗面安山岩、安山岩和粗面岩以及英安岩和流纹岩^[167], 属高钾钙碱系列, 痕量元素表现为Nb, Ta, P和Ti亏损, 有较宽的Rb, Ba和Sr含量, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr初始比值一般低于0.7070. 安山岩和凝灰岩的锆石年龄是91~65 Ma^[154,168], 这些岩石可能表明该区是一个岛弧带. 其东南侧日本岛存在一系列晚白垩世岩石单元(图6(a)), 日本外带的古近纪四万十(Shimanto)增生杂岩带, 向北依次是晚白垩世四万十混杂岩带、三波川(Sanbagawa)变质带和弧前盆地, 混杂岩带中还发育有侏罗纪伏父(Chichibu)增生杂岩. 三波川带的变质年龄为90~70 Ma, 弧前带流纹岩和花岗岩的年龄是86~84和74~62 Ma^[52,169]; 向西南, 至中国东南沿海, 古太平洋俯冲相对应岩浆活动为晚白垩世(88~94 Ma^[170]). 因此, 晚白垩世日本岛、朝鲜半岛南部和中国东南沿海一带应该是一条完整的火山岩带, 平行于晚白垩世古太平洋板块俯冲带展布(图6(b)). 但晚白垩世向东的构造跃迁使得华北在燕山晚期远离俯冲带, 故没有显著的古太平洋俯冲响应. 此后, 日本海盆扩张、洋壳形成发生在

~15 Ma之后^[171], 导致一些燕山晚期的块体裂离东亚陆块.

2.3 华北洋陆过渡带深部过程

华北克拉通现今深部结构可以通过高精度层析成像(图7)揭示. 郭慧丽等人^[151]发现, 华北克拉通东侧“俯冲”板片高速体在约300~400 km深度范围内被低速物质分割, 暗示俯冲的“太平洋板片”可能发生了断离; 并认为, “太平洋板片”的俯冲(断离)导致热异常, 触发热地幔物质上涌, 并使得上覆地幔楔内形成对流, 进而使华北克拉通岩石圈受到改造(热侵蚀、底侵或弱化)或机械破坏. 随着俯冲板片后撤, 地幔楔中的对流场以及对岩石圈改造的影响范围均随之东移(图8(a)).

然而, Liu等人^[6]的结果表明, 该区深部滞留板片的俯冲时间不过30 Ma, 因此, 太平洋板块新生代的俯冲不可能与华北克拉通中生代破坏有关. 为此, 本文基于郭慧丽等人^[151]发现的华北克拉通地区的上地幔中3个东倾排列的高速异常体, 结合前人大量地表岩石学、地球化学研究揭示的深部拆沉现象, 试图综合提出一个地质、地球物理和地球化学上都相对合理的现今深部大地幔楔年代结构和深部过程的构造模型.

如果按照时间来统计文献中不同地域的深部拆沉过程, 华北克拉通深部几乎在中生代时期始终在连续不断地拆沉, 只不过发生在不同区域, 再多的类似研究只能增强这个认识, 然而, 这与该区地质事件或岩浆事件的幕式特征不吻合. 为此, 本文还是根据幕式地质事件的约束, 将深部拆沉作用分为多个阶段.

本文认为第一阶段拆沉是印支晚期华北向SE楔入到大华南地块之下的华北地块的岩石圈板片向西撕裂^[61], Yang等人^[150,172]也提出华北克拉通的破坏始于东部(辽宁)岩石圈下部的拆沉, 软流圈地幔上涌导致了211 Ma的相关花岗岩侵入体及基性微粒包裹体. 因此, 本文认为华北克拉通初始破坏的深部机制与古太平洋板块俯冲无关, 而是与华北地块楔入大华南地块的板片撕裂和大陆岩石圈地幔下部拆沉相关, 这也不同于张旗^[47]提出的“中国东部中生代大规模岩浆活动与太平洋板块的向西俯冲无关”, 因为正如前文所述, 中生代古太平洋板块俯冲期间, 太平洋板块确实与华北克拉通没有直接相互作用. 但是一系列上述岩浆岩年龄分布等特征还显示, 中生代后期华

北克拉通破坏的深部机制可能与古太平洋板块向西俯冲楔入^[86]引发的岩石圈地幔深部的更上层或更浅层被撕裂或被拆沉的地质体以及伴生的底侵逐渐向东后撤相关。

综合东亚幕式岩浆事件(图9)、构造事件等,可以发现华北克拉通首先是其东北角地区深部发生了一幕拆沉,时间为250~200 Ma之间^[150,172];随后在190~150 Ma的第二幕发生了更为广泛的拆沉(图6),空间上波及朝鲜和胶辽吉地区^[173],连同华南中东部,总体NNE走向^[149];第三幕拆沉主要发生在鲁西地区,时间上对应145~110 Ma的岩浆活动^[174,175],波及区域包括鲁西和其以东,更靠近太平洋一侧。其中,后两次拆沉可能与古太平洋板块向西俯冲楔入^[86]有关,促进了华北克拉通破坏。因而,总体上,本文称该模式为:三阶段分层拆沉模式或幔内剥皮模式,不同阶段剥皮式拆沉的对象不同,可能会导致不同时期岩浆岩的地球化学差异,且拆沉发生的时空差异导致了岩浆岩时空分布的差异(图8)。

这里需要讨论的是:层析成像^[151]所揭示的大地幔楔的年龄结构和形成年代格架如何,而不是像张旗^[47]那样去否定其结构样式的存在。按照地壳均衡模型, Moho面起伏与盆地和山脉地形通常呈镜像关系,因此,盆地成盆年代和山脉隆升年代可间接约束 Moho面形成年龄。首先约束现今大地幔楔主体形成

可能的最早和最晚年齡,最新状态的Moho面大概始于25 Ma, 滞留的太平洋板片形成年龄也在30 Ma左右^[6];岩石圈减薄前的最晚时间大概是250 Ma^[150],实际减薄峰期为160~135 Ma,因此,现今地幔楔结构形成时间应当介于250~30 Ma之间。再者岩石学、地球化学研究揭示,晚白垩世以来华北克拉通岩石圈基本无拆沉过程发生,因此,现今状态的地幔楔结构(不含滞留板片和其附近的低速体部分)的形成时代可很好约束在250~100 Ma期间。锆石/磷灰石裂变径迹等揭示,地表山脉还经历了160, 145, 120, 60, 40 Ma左右的隆升事件^[161,176,177]。

结合前文华北三期幕式岩浆活动^[100](图9),和朝鲜狼林地块上224~234 Ma的正长岩-辉长岩体^[160],推测图8(b)第一阶段拆沉可能起始于211 Ma辽东深部的岩石圈地幔底部的撕裂^[150,172];之后,这个被撕裂的岩石圈在第二阶段拆沉期间持续向西拓展,表现在地表160~150 Ma岩浆作用向西拓展(图6),对应松辽盆地-渤海湾盆地西部及其以西地区记录的火山喷发、岩浆侵入、盆地伸展活动。第二阶段拆沉全区可能发生在190~150 Ma期间,对应朝鲜、鲁西和胶辽吉地区的花岗岩侵入事件,拆沉表现为反向断离(图6和8(b)),形成了两条侵入年龄分带反向的花岗岩带。而第三阶段拆沉发生145~110 Ma之间, A型花岗岩发育^[178],其中145~141 Ma^[179]或125~105 Ma^[101,180]浅表

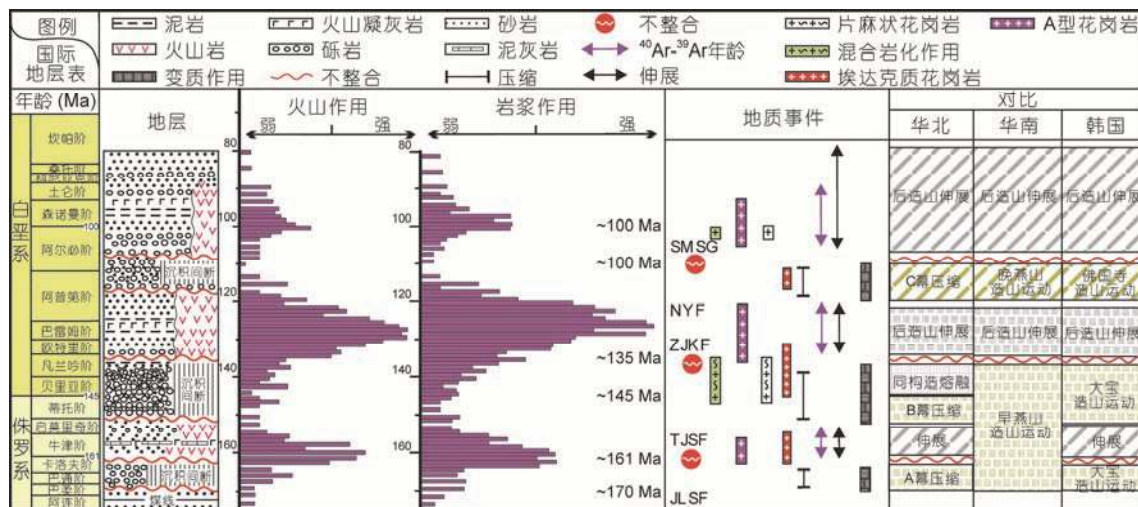


图9 东亚地区中生代幕式构造-岩浆活动规律(据文献[100])。JLSF, 中侏罗世九龙山组; ZJKF, 华北早白垩世张家口组; NYF, 南院组下白垩统火山岩; SMSG, 华北东南缘中白垩世石冒山群; TJSF, 华北晚侏罗世髻髻山组

Figure 9 Mesozoic episodic tectono-magmatism in East Asia (after Ref. [100]). JLSF, Middle Jurassic Jiulongshan Formation; ZJKF, Early Cretaceous Zhangjiakou Formation in North China; NYF, Lower Cretaceous volcanic rocks of the Nanyuan Formation; SMSG, Middle Cretaceous Shimaoshan Group in SE China; TJSF, Late Jurassic Tiaojishan Formation in North China

效应对应渤海湾盆地东部-胶莱盆地-北黄海盆地及其以西地区记录的火山喷发、岩浆侵入、盆地伸展活动；其东部可持续到在110~80 Ma^[100]，可能是第三阶段拆沉的继续，对应东海陆架盆地及其以西南沿海地区记录的火山喷发、岩浆侵入、盆地伸展活动(88~94 Ma^[170])。可见，岩浆活动不断东迁与深部拆沉对象向东迁移，且岩浆岩成分变迁与拆沉对象逐渐越来越浅有关。

据此推断，第一阶段拆沉的可能为石榴石相橄榄岩地幔或俯冲的华北克拉通岩石圈地幔有关，第二阶段拆沉的为尖晶石相橄榄岩地幔或部分下地壳对应，第三阶段拆沉的主要为下地壳有关。这个推断虽然有待岩石学、地球化学深入检验，但这里内在的事实规律说明，现今层析成像揭示的大地幔楔结构可能形成于中生代，这个形成时间完全不同于地幔过渡带的滞留板片结构形成于30 Ma以来的时间^[6]。总之，华北克拉通岩石圈经历了三阶段依次自下而上整体西向分层拆沉、东向总体减薄量累计增加的过程(图8)。这一模式不仅能很好地解释现今华北克拉通岩石圈减薄导致的深部Moho面或岩石圈底面自西向东呈台阶状抬升的现状，而且能够很好解释印支晚期之后的岩浆岩年龄分带、盆地沉积沉降中心总体向东的跃迁趋势，以及向东的俯冲后撤过程^[27]。

尽管如此，上述地震层析成像所观测到的也确实只是现今的状态，大地幔楔形态显然不是小地幔楔那样直接与现今俯冲过程相关，但也不能据此肯定在中生代时期就存在目前揭示的大地幔楔。按照板片在地幔中下降速度^[6]和上述华北地块东部地表岩浆作用的时空迁移规律，大地幔楔是中生代华北克拉通破坏过程中逐步形成的认识，目前也只能停留在探索阶段，图8(b)也只是一个基于现有大地幔楔结构对中生代可能地幔过程的一个解释模型，需要未来进一步数值模拟检验，但不可否认可能存在30 Ma以来的热、流体和熔体对老地幔楔的改造。

综上所述，210 Ma之前华北东部经历了印支晚期变形后，可能岩石圈就已经增厚，华北克拉通东北角的部分地区开始了拆沉，同期出现伸展和A型花岗岩的出现^[150]。这个深部拆沉过程是在前述三大洋都向东亚大陆之下俯冲挤压的大背景下发生的，浅表应当处于大汇聚的挤压环境^[100]，深部拆沉导致的浅表伸展或张扭效应非常短暂，甚至波及鄂尔多斯盆地内部，出现176 Ma的火成碳酸岩浆活动^[181]，及后续

浅表175~160 Ma的挤压作用，即燕山早期形变发生。

燕山早期变形向西拓展到内陆，至160~150 Ma达到顶峰，发生图6(d)和8(b)中的第二阶段(190~150 Ma)拆沉的岩石圈地幔向西进一步撕裂，而主体新拆沉的板片在渤海湾盆地及其以东的深部，但在周边板块挤压背景下，再次引起后续浅表150~135 Ma期间整个东亚地区再次遭受挤压逆冲，即燕山中期形变发生；燕山中期形变导致区域性岩石圈进一步收缩、挠曲、增厚并拆沉，继而引发135~120 Ma浅表广泛的中地壳康拉德面的区域性伸展(图5(b))，经后期不均一剥露，形成大区域带状广泛弥散分布的大量变质核杂岩，和华北克拉通中东部132~124 Ma的碳酸岩浆活动^[181]，但是这些现象依然受前期造山带或深大断裂带的空间制约。从大区域挤压背景下广泛的伸展角度看，这与科迪勒拉变质核杂岩存在巨大差异。

同样，120~110 Ma期间在周边板块挤压背景下，东亚地区发生压扭性或张扭性活动，地壳或岩石圈增厚不够显著，但可能引发第三次拆沉(145~110 Ma)，可持续到110~80 Ma，经过前期拆沉减薄后的较薄岩石圈或新底侵增生的岩石圈再次拆沉，故进一步使得下地壳也发生部分拆沉^[174,175]，引发鲁西地块、胶莱盆地-江汉盆地及其以东地区出现广泛的玄武岩喷发及其他侵入类型基性岩浆活动^[176,177]。

这三幕拆沉之间的挤压变形活动，分别对应燕山期三幕变形，形成了3个区域性角度不整合。因此，上述伸展与挤压活动的10~30 Ma周期的交替性、总体向东的空间迁移规律，是长期以来周边三大古洋大汇聚的挤压背景下深部幕式拆沉过程在深层空间的迁移所致，并可能是北部鄂霍茨克洋、南部班公湖-怒江洋(新特提斯洋)俯冲关闭^[100]，推动华北克拉通之下的地幔软流圈总体向东挤出、迫使古太平洋板块俯冲向东后撤有关，而不是平板俯冲变成高角度俯冲产生的海沟吸引力使得地幔软流圈向东运动^[182]。

3 大华南洋陆过渡带构造-岩浆作用迁移

3.1 大华南洋陆过渡带变质变形

(i) 大华南地块东部燕山早期西向渐新的逆冲变形与燕山晚期西压东张。华南东部燕山期变形与华北的一样，发育宽阔的NNE走向构造变形带为特征，但其规律更为清晰，保存更为完整。华南中部燕

山期褶皱-逆冲的类型向西发生了显著转换,四川盆地华蓥山断裂以东隔挡式褶皱作用主要发生在晚侏罗世-早白垩世^[183],雪峰山西侧山前和雪峰山南缘的柳州-河池地区可见上白垩统被前寒武纪基底逆冲覆盖^[184],因而挤压逆冲在雪峰山以西和以南可持续到晚白垩世. 齐跃山断裂以东的隔槽式褶皱作用不仅早于华蓥山断裂与齐跃山断裂之间的隔挡式褶皱作用,而且也持续到晚侏罗世-早白垩世^[185]. 因而,雪峰山基底隆升带以西,可见变形启动时间向西渐进变新,拓展过程也如此^[92]. 这种向西渐新的变形拓展也体现在:中生代不整合的数目在整个华南表现为由东往西减少,最早的角度不整合向西逐渐变新,并且不整合性质向西由高角度,变为微角度,再转变为平行不整合^[92]. 然而,在雪峰山基底隆升带以东,印支期存在先后两幕褶皱作用^[15,185],现今表现为穹盆褶皱叠加样式;燕山期在雪峰山以东地区,主要表现为向西逆冲的坡坪式逆冲推覆,平面上出现一系列向西凸出的弧形构造,使得早侏罗世大型湖盆被变形肢解,前人曾认为这些弧形构造是弯山构造^[186]. 再向东,在华夏地块,燕山期逆冲推覆主要表现为总体向东的逆冲推覆^[187],在中国东南沿海地区直至东海陆架盆地区,此时的盆地中还有海相沉积建造,前人认为是受挤压弯曲出现的周缘拗陷型盆地,直到早白垩世转换为古太平洋俯冲带的前弧盆地^[188,189],这也说明沿俯冲带中侏罗世之前可能还没有隆起成山,该区出现安第斯型大陆边缘是晚侏罗世-早白垩世的强烈俯冲所致.

华南与华北燕山期变形有一个巨大的不同,即燕山晚期华南雪峰山以东开始出现广泛的裂解,被认为是科迪勒拉型伸展构造^[190],实际上总体以张扭性拉分盆地为主^[37],花岗岩对其形成也起了重要作用,称为花岗岩热隆^[191]. 此时,变质核杂岩(图7)也很发育,如衡山、庐山、武功山等,因此得出挤压向伸展转换启动时间在136 Ma,大概在97 Ma结束^[192,193]. 然而,雪峰山以西和以南逆冲推覆构造持续到晚白垩世尚未结束,可见一些古老地层逆冲到晚白垩世红盆之上^[184,194]. 雪峰山以西的构造虽然超越了本文的洋陆过渡带(图2)核心内容,但与东部洋陆过渡带演化密切相关,因而,在此一并探讨. 华南这种燕山晚期东张西压的构造变形,很难用古太平洋板块俯冲的远程效应来解释,而且构造地质理论上,张扭性断层作用也会大大弱化古太平洋板块俯冲的作用,

难以解释雪峰山西侧持续的NW向挤压,因此大陆内部必然有某种自身的深部机制,导致逆冲持续的向西拓展^[187],而这个深部过程可能就是由岩浆作用揭示的西向同步拆沉(图10).

(ii) 华南东部的盆地群:古太平洋俯冲背景下燕山期统一的区域挤压. 台湾记录了东亚陆缘的燕山晚期一次重大变形变质事件——约90 Ma的南澳运动,被认为是大南澳微古陆和欧亚大陆的碰撞,导致俯冲带跃移至大南澳微古陆东侧以及局部俯冲极性反转. 大南澳群主要为黑云母片岩、绿片岩、硅质片岩和一些灰岩组成,一直被认为是晚中生代东亚陆缘俯冲作用的结果^[37]. 杂岩变质年龄能揭示俯冲时间、高温低压带或低温高压带的变质作用时间. 太鲁阁带以变质的绿泥石片岩、黑云母片岩相的低压组合为特征(但其北部与花岗深成岩有关的角闪岩相组合除外),其变质程度向东逐渐增加,可能表明古太平洋板块早期向东俯冲,后期反转为向西俯冲,形成了花莲县的和平-知本地区的太鲁阁带内蓝闪石片岩. 大南澳片岩中两个花岗岩侵入体的锆石U-Pb年龄为85~90 Ma,与S型二云母花岗岩相伴的伟晶岩的K-Ar和Rb-Sr年龄也为86 Ma^[55]. 此外,玉里带内亚蓝闪石角闪岩于79 Ma时结晶,该带内的软玉和一些其他外来片岩、角闪岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄为67~80 Ma^[55]. 由于形成混杂的俯冲作用年龄应该小于外来岩块的年龄. 所以,结合大南澳群的最老变质年龄,其构造-热事件应该在166~67 Ma之间^[55].

响应古太平洋俯冲的动力学,白垩纪扬子板块变形和成盆特征,在中上扬子地块和下扬子地块中表现正好相反^[3]. 中上扬子地块为一个三角形块体整体向SWW向逃逸,NEE部为引张区形成张性盆地,如,江汉盆地深部的中生代盆地格局^[135];中部为走滑构造发育的挤压褶皱区,在贵州可见大量NNE向左行走滑断裂^[194];SWW部为前缘压陷型四川盆地的西缘^[195]. 白垩纪期间,武夷山两侧的盆地呈右阶斜列^[196],表明至少这种挤出边界活动始于白垩纪,而且这一过程可能持续到新生代,如,在第四纪洞庭湖盆地的演化历史中仍有这种特征. 而楔形的下扬子地块在南部青阳-南通右行和北部全椒-响水左行走滑断裂的围限下,自SW向NE方向逃逸^[131,134],此楔形块体内的东北为挤压区,中部为过渡区,西南为引张区^[131,134](图5(a)). 在华南南部同样存在侏罗纪-早白垩世的复杂压扭性走滑构造,调节着不同的块

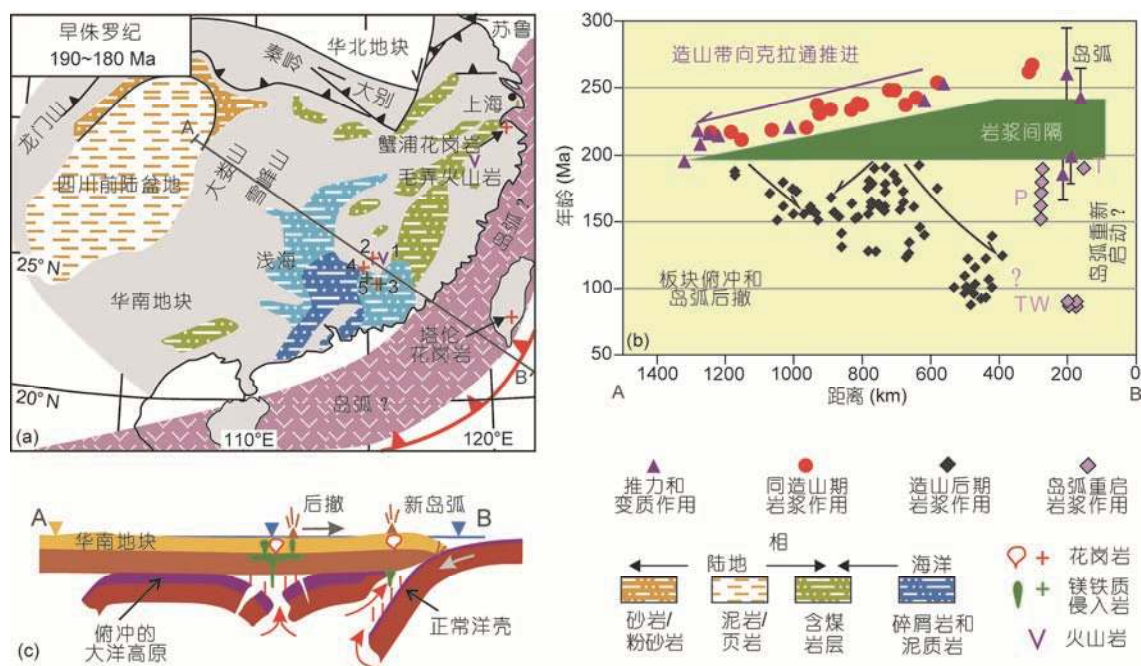


图 10 华南早侏罗世盆地、花岗质岩浆岩年龄分带与平板俯冲模式(据文献[20])。 (a) 华南早侏罗世盆地; (b) 华南花岗质岩浆岩年龄分带; (c) 华南平板俯冲模式

Figure 10 Flat subduction and age zonation of granitic plutons in South China (after Ref. [20]). (a) Early Jurassic Basin in South China; (b) age zonation of granitic plutons in South China; (c) flat plate subduction model for the South China Block

体^[197-199]。雪峰山基底隆升带内也存在一些走滑断层控制的挤出构造^[194]；这种走滑甚至延伸到南海北部、东海海域，控制着新生代陆架盆地的演化^[200,201]。

3.2 大华南洋陆过渡带岩浆岩

华南岩浆岩分布最大的特点是：多期岩浆活动主要集中在雪峰山以东，四川盆地地表和地震剖面揭示中生代没有遭受任何岩浆活动破坏。大华南地块内与俯冲相关的岩浆岩除了成分具有显著特点、成分极性、时空分区分带的分布差异外，其年龄还伴随俯冲过程、俯冲方式不同和变化，而在空间上发生分带性和迁移性，因此，可以利用这些规律来探讨俯冲启动时间、俯冲过程和俯冲极性。例如，传统华南地块的相关岩浆岩研究很好地揭示了这种迁移规律^[20,28,202](图10)。

(i) 华南印支期花岗岩向西渐新与前进式平板俯冲。Li等人^[20]根据华南最早的钙碱性I型花岗岩年龄，确定了古太平洋板块向华南大陆边缘俯冲，俯冲启动时间为265 Ma或更早，随后，俯冲导致华南的印支期造山运动发生于265~190 Ma之间，进而导致了~1300 km宽阔的造山带形成。图10(b)的265~190

Ma的岩浆岩年龄表现为由海沟向克拉通内部逐渐变年轻，并且这些岩浆岩的侵位空间也向内陆迁移，为了解释这个宽阔的岩浆岩年龄向内陆变小的分带和迁移现象，Li等人^[20]提出了古太平洋板块的西向平板俯冲模式(图10(c))，现今看这个规律不仅仅适用于传统的华南地块。

与传统华南地块花岗岩形成机制不同的是：韩国洪城杂岩附近的纹长花岗岩的锆石U-Pb年龄是225~231 Ma^[148](图6(a))，年龄可与出露在胶东半岛威海地区的苏鲁-大别山造山带的东北缘辉长岩-碱性花岗岩相比，后者的年龄相对较年轻(213~205 Ma)，被认为是碰撞后伸展的产物^[195]，但这种伸展并非是区域性拉张，而可能是受印支期深俯冲的华北克拉通东南缘向苏鲁带之下俯冲后的拆沉过程制约。直到侏罗纪，韩国湖南剪切带附近的侏罗纪花岗岩与朝鲜北部的侏罗纪花岗岩没有任何差别，残留锆石年龄都集中于约1.8~2.5 Ga。特别是韩国侏罗纪花岗岩内的残留锆石年龄似乎指示朝鲜半岛基底为华北型克拉通基底，这与盆地分析结果一致^[203]，但该花岗岩中残留锆石也可能如Li等人^[61]提出的华北克拉通印支期向南楔入大华南地块后的侏罗纪熔融

岩浆中的俘获锆石。也即是说, 朝鲜半岛这些印支期至侏罗纪花岗岩成因与传统华南地块上的成因不一致, 与古太平洋板块向传统华南地块之下平板俯冲^[20]无关, 而是与华北地块向大华南地块下印支期俯冲^[61]有关。

(ii) 华南燕山早期花岗岩分带与深部反向拆沉。190 Ma以后, 传统华南地块的岩浆岩年龄整体又表现为向海沟逐渐变年轻的宏观规律^[204](图10(b)), 可以用俯冲板片向海沟侧的回卷(rollback)给予解释。然而, 距离古海沟600~800 km的地带所见岩浆岩年龄异常(图10), 不符合总体变年轻的趋势, 因此, Li等人^[20]提出平板式俯冲的大洋岩石圈板片中部发生了断裂后, 断裂两侧的相邻拆沉板片190~135 Ma期间发生了对开门式(double-saloon door)的反向拆沉(图6(b)和10(c)), 并且深部地幔对流可能导致华南中部(如湘南一带)发生浅部动力沉降, 进而导致了华南地块东部的这个地带浅表形成了燕山早期浅海相的宽阔拗陷型湘中盆地(图10(a))或南岭地区EW向分布的裂陷盆地(碰撞谷?)。后者发育早-中侏罗世双峰式火成岩, 玄武岩与流纹岩厚度近于相等, 并有少量同期含霓辉石碱性花岗岩共生, 玄武岩具有隐晶少斑结构特点, 反映其形成于较快速率的伸展-裂谷背景^[205], 构造解析研究揭示此时华南处于NWW-SEE向区域挤压作用之下^[193], 与此并不矛盾。

(iii) 大华南地块东部燕山晚期双峰式岩浆作用向东渐新与俯冲后撤。135 Ma以后的燕山中晚期, 华南东部浙闽粤沿海发育一套双峰式火山岩、双峰式侵入岩和碱性花岗岩, 其分布西侧受平直的深大断裂控制, 处于近南北向区域拉张(即东西向挤压)背景下^[193]或张扭背景下, 与此同时, 早白垩世玄武岩又具有陆缘弧拉斑玄武岩特征^[205], 且出现标志的A型花岗岩^[178]。A型花岗岩主体发生在135~100和100~70 Ma^[178]两个时期。前者分布于中国东部较广区域, 主要分布于下扬子带、苏鲁带、山海关带和碾子山带, 相对后者偏西侧内陆分布; 后者分布在华南东侧东南沿海的闽浙带。两者都就位于剪切拉伸桥部位, 受东亚大规模宽阔的张扭性剪切带控制, 年龄分布上具有向海变年轻的趋势。

这一切综合起来分析, 华南东部大陆边缘类似科迪勒拉型活动大陆边缘, 但其大规模的张扭活动则与典型科迪勒拉型盆岭伸展构造有巨大不同。因而, 本文支持王德滋等人^[178]提出的华南东部是宽阔

张扭走滑断裂发育的安第斯型大陆边缘。最近, Suo等人^[202,206]通过东海陆架盆地大量地震剖面解析, 同样揭示了这个地区新生代以来的岩浆岩年龄分带现象, 发现新生代岩浆作用继承了中生代向东迁移的特性, 但伴随的大规模盆地却与张扭拉分过程密切相关, 可能是太平洋板块俯冲后撤所致, 浅部导致安第斯型大陆边缘向西太平洋型大陆边缘转换, 同时出现巨型地形倒转, 东海陆架盆地裂陷形成^[28]。这些成果表明, 构造研究必须紧密结合岩浆岩相关研究, 因为岩浆岩可以揭示深部构造过程, 是深部过程和浅部响应紧密结合研究的纽带。

按照Kadariusman等人^[207]的板块重建, 早白垩世晚期(燕山晚期的早期阶段)太平洋逐渐出现两条近东西向扩张脊(图11), 而太平洋西南部为被动陆缘, 这就迫使依泽奈崎板块以2倍的运动速度向NNE方向快速斜向俯冲, 消减于西太平洋陆缘北东走向的安第斯型东亚大陆边缘岛弧之下, 并引发陆缘大规模左行走滑拉分。晚白垩世(燕山晚期的晚期阶段)俯冲带的位置仍无大的变化(图11(c)和4(a))。朝鲜半岛庆尚火山岩带和对马岛的花岗岩时代都是晚白垩世^[52]。台湾海峡金门岛、马祖岛、长乐岛的花岗片麻岩时代为109~92 Ma, 伟晶岩和流纹英安岩为90 Ma^[52], 也都是白垩纪。张旗等人^[208]认为太平洋板块西向俯冲主要发生在晚白垩世85~66 Ma这个很短的时期, 且中国东部(黑龙江除外)很少有该时期的岩浆活动记录, 认为俯冲并未产生大规模的岩浆活动, 但Niu等人^[80]认为这种现象与俯冲带被海底高原堵塞有关, 按照Yang^[71]的板块重建, 至少不是Okhotomorsk海台的堵塞。但他们一致认为正是由于外来海底高原的堵塞作用, 导致俯冲带发生向东的后撤, 新的俯冲带在太平洋一侧形成, 实现了俯冲带跃迁, 随着东亚陆缘向东的蠕散, 中国东部新的大地幔楔属性自然变成了大洋岩石圈地幔。而且, 台湾中央山脉东翼大南澳片岩的双变质带(西部太鲁阁带、东部玉里带)时代为晚白垩世(86 Ma, 但也有人测得玉里带9~14 Ma的蓝片岩年龄), 琉球群岛的石垣-甑岛双变质带、日本的领家-三波川双变质带(90 Ma)也是晚白垩世^[55]。这说明台湾西部、琉球岛弧、日本岛弧最晚于晚白垩世后(实际是35 Ma后)才开始从亚洲大陆裂解, 随后新生代晚期琉球岛弧、日本岛弧裂离而最终到达现今位置。所有这些特征都表明, 自晚白垩世以来, 西太平洋俯冲带发生了向东的显著后撤。

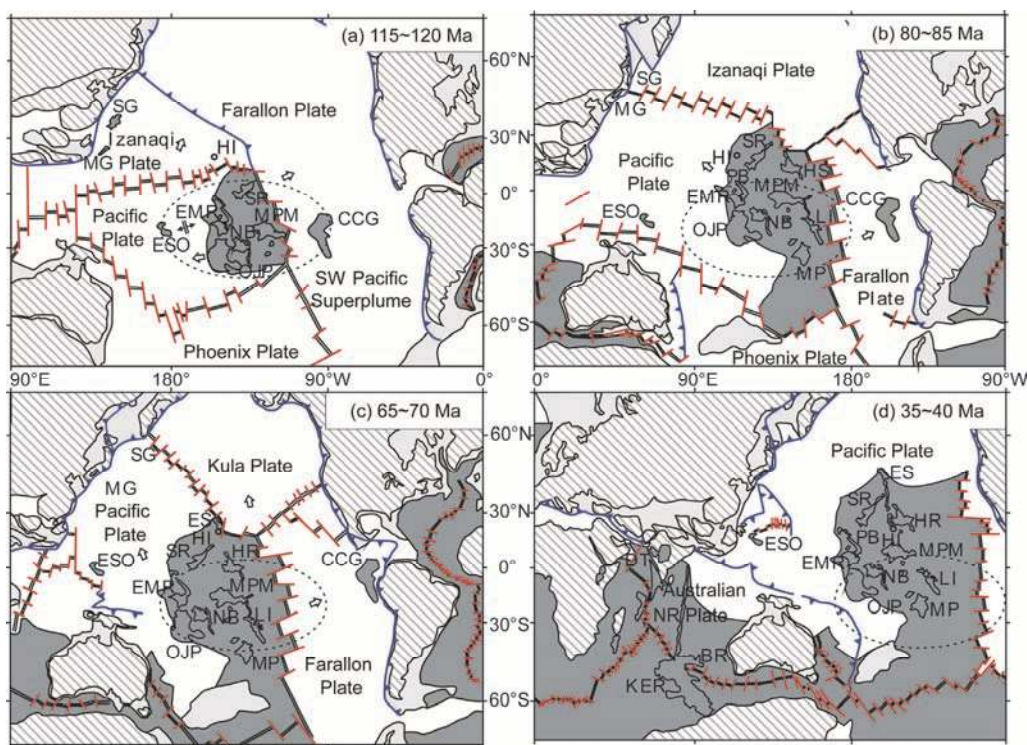


图 11 (古)太平洋板块与东亚陆缘板块重建^[207], 图中Kula板块即依泽奈崎板块, 其余代号和缩写见文献^[207]

Figure 11 Plate reconstruction of the (Paleo-)Pacific Plate and the East Asian Continental Margin^[207]. The Kula Plate is the Izanaqi Plate in this figure. Other English names and abbreviations seen in Ref. [207]

(iv) 大华南地块东部燕山晚期埃达克岩分布与板片窗叠加的可能性. 最近一些岩石学、地球化学研究揭示, 日本西南和中国下扬子、胶东地区存在洋中脊俯冲产生的板片窗^[77-79,207], 支持洋中脊垂直欧亚板块东部陆缘的俯冲消减模式(图11). 板片窗构造主要出现在125~110 Ma左右^[79,207](图11), 形成了中国东部长江中下游独特的成矿和埃达克岩等岩浆作用^[79], 以及日本和吕宋岛等的110 Ma的岩浆岩异常——埃达克岩^[77,78,209], 这似乎也表现在日本125~60 Ma的花岗岩类空间分布总体表现为向北西开口的“V字形”^[52]. 对照东太平洋陆缘, 按照最新板块重建成果, 库拉板块(图11(c))只是太平洋板块在70~20 Ma期间位于阿拉斯加南部和加拿大东部海域的古板块^[31], 其相关洋中脊俯冲导致在阿留申群岛上出现了一系列串珠状埃达克岩.

埃达克岩也可以起源于增厚地壳和岩石圈地幔的拆沉等. 但是, 在岛弧这个总体环境下, 空间上有规律分布、时代上有规律跃迁演变的埃达克岩, 则可能与洋中脊俯冲有关, 而且这种时空分布可能与洋内的洋中脊-转换断层组合方式密切相关. 目前研究

中存在的矛盾是: 不同人员从不同角度得出不一致的洋中脊-转换断层组合方式. 如按照Müller等人^[31]的重建, 55 Ma之后才可能发生洋中脊俯冲, 依泽奈崎-太平洋板块之间的洋中脊平行东亚陆缘, 其状况可能类似环文林等人^[210]的大陆边缘构造复原图, 不可能出现典型的板片窗, 即使出现, 也应晚于55 Ma时间, 而这之后华南又不存在埃达克岩分布^[149]. 另外一派重建得出, 依泽奈崎-太平洋板块之间的洋中脊垂直东亚陆缘^[207](图11). 太平洋板块自185 Ma生成以来, 其相对于欧亚板块的运动方向也是在不断发生变化的, 125 Ma或120 Ma之前, 太平洋板块向SW方向漂移^[28](图11(a)), 此时(135~85 Ma)依泽奈崎板块总体为NNW向运动^[211]; 大约125~120 Ma, 太平洋板块漂移方向发生重大转折, 顺时针偏转约80°, 改向NW方向俯冲, 并一直持续到大约100 Ma或80 Ma(图11(b)); 其中, 110 Ma时还发生过小的偏转. 在黑龙江东部及锡霍特阿林地区, 还伴有112~84和85~65 Ma的从基性到酸性深成岩浆活动, 且日本岛弧地区研究表明, 85~66 Ma或53 Ma^[71]期间, 太平洋板块向NNW向俯冲(图11(c)), 期间85~75 Ma太平洋

板块与东亚的汇聚量最大;至少65~43 Ma期间,可能与皇帝海岭指示的太平洋板块向北或NNW运动方向相同(图11(d)).但是,即使从这个重建(图11)也可以推测,太平洋板块初始直接作用于东亚陆缘也是至少110 Ma之后,而之前的依泽奈崎板块的运动方向尚无可靠认知,目前值得参考的也只有Engebretson等人^[212]不准确的定性描述和Müller等人^[31]、Seton等人^[35]的定量速度场重建.

但是在125~110 Ma期间,东海陆架盆地所处的构造背景可能依然类似现今的安第斯山脉,是依泽奈崎板块直接俯冲于欧亚板块之下的结果^[31],浙闽一带的晚侏罗世-早白垩世火山岩盆地可能是其斜向俯冲导致一系列拉分断陷群内火山喷发的产物,该火山岩带向北东延至韩国庆尚盆地,向西南延至南海北部^[189]和越南东部一带. Müller等人^[31]的重建则认为这个阶段始终是转换断层近于垂直俯冲带或海沟.可见,这个阶段的东亚陆缘地幔窗体的出现,是洋中脊俯冲产生的板片窗,还是转换断层调节的板片撕裂导致,尚存在不同认识.

(v) 大华南地块东部燕山期岩浆岩与构造成因环境判别.除了考虑俯冲盘的板片结构差异可能导致岩浆岩类型和时空分布变异外,还需要考虑仰冲盘岩石圈三维结构,这样才能稳妥判断岩浆作用发生的构造环境.一般岩石学上来说,在华南沿海地区辉长岩/玄武岩-花岗岩/流纹岩等复合火成岩(130~101 Ma)和壮观的镁铁质岩墙群(95~85 Ma)应当是形成于伸展环境^[213];但要是从构造地质学原理出发,这是不可理解的.因为伸展多数对应的是正断层组合,正断层不可能深入岩石圈底部成为岩浆通道,往往在中地壳就变成铲形断层.因此,本文更倾向万天丰和赵庆乐^[214]认为的:岩浆源区是在构造断裂与圈层界面的控制下,发生了构造滑脱作用,在减压、增温的过程中形成的;断层切割深度不同,就构成了不同类型的岩浆活动,并可形成各具特色的相关矿床.实际上,华南这些基性岩浆主要受广泛的岩石圈尺度的张扭性断裂控制的减压熔融所致,如长乐-南澳、政和-大浦断裂,这些断裂在地表表现平直,不可能是纯粹的正断层,岩石圈尺度三维的多性质断裂网络有多复杂,岩浆运聚的模式就有多复杂.因而,华南构造演变也不能就此落于伸展与挤压交替的简单构造演化模式或论争.

人们也常常将华南大陆的伸展与挤压与周边板

块的运动状态建立某种紧密联系.但是,张旗^[47]指出以往将中国东部块体早侏罗世^[215]、120 Ma^[79]或100 Ma以前的构造运动方向和太平洋板块指示的方向联系起来可能都是错误的,因为无论是110 Ma^[207]或100 Ma^[71]或60 Ma^[31]之前,都可能是依泽奈崎板块作用于东亚陆缘.虽然依泽奈崎板块和太平洋板块那时都在古太平洋内,但两者运动速度也可能完全不同.而且,即使此时太平洋板块直接作用于东亚洋陆过渡带,那也只有俯冲带上下盘处于完全耦合状态下,110 Ma以来或新生代东亚陆缘块体运动,才可能与太平洋板块运动方向具有可对比性^[145,216],可是目前尚没有明确证明它们是耦合的.例如,从Kula板块与Farallon板块间的洋中脊50~49 Ma作用于北美大陆边缘^[217]的时候,形成了板片窗,并直到该洋中脊消亡,才演变为现在的胡安·德·富卡板块,可见大洋板块的运动与洋陆过渡带的地体拼贴过程似乎关系不大,具有随机性.

3.3 大华南地块洋陆过渡带深部过程

袁学诚和华九如^[218]从穿过华南陆块的6条P波地震层析剖面(图12)出发,对华南岩石圈三维结构作了初步探讨.据此,将华南岩石圈分成三大部分,钦杭断裂带东南为华夏岩石圈,为东南亚-西太平洋低速带的一部分,该带岩石圈地幔都受到180~80 Ma软流圈物质上升及基性岩浆底侵^[219]而被改造,部分地区幔源物质侵入地壳,形成丰富的矿床.川湘黔裂陷槽以西为上扬子岩石圈,在地表是一个热块体,但在深部有延伸超过200 km的高速基底.上扬子岩石圈受到其西攀西地幔柱的改造,在壳-幔过渡带产生峨眉山岩浆房,在古生代末曾引发玄武岩的大面积喷发,至今仍在滇西留有岩浆房^[218],并产生丰富的热泉.川湘黔裂陷槽与钦杭断裂带之间是中扬子岩石圈,在地表是一个冷块体,在湘中实测热流值低到小于20 mW/m²,根据热流值计算得到的岩石圈厚度达到异常的300 km^[218],具有低速、低电阻率特征,与大地电磁测深得到的结果相似.总体上,华南岩石圈平均厚度约150~200 km(图12).

华南岩石圈厚度现今是不均一的,减薄程度和范围皆不如华北^[149].据岩石学研究结果,湖北大洪山早奥陶世岩石圈厚度是110 km^[215],这与现今该区域层析结果揭示的现今岩石圈厚度一致(图12),意味着该区深部中生代未发生拆沉.然而,华南现今深部结

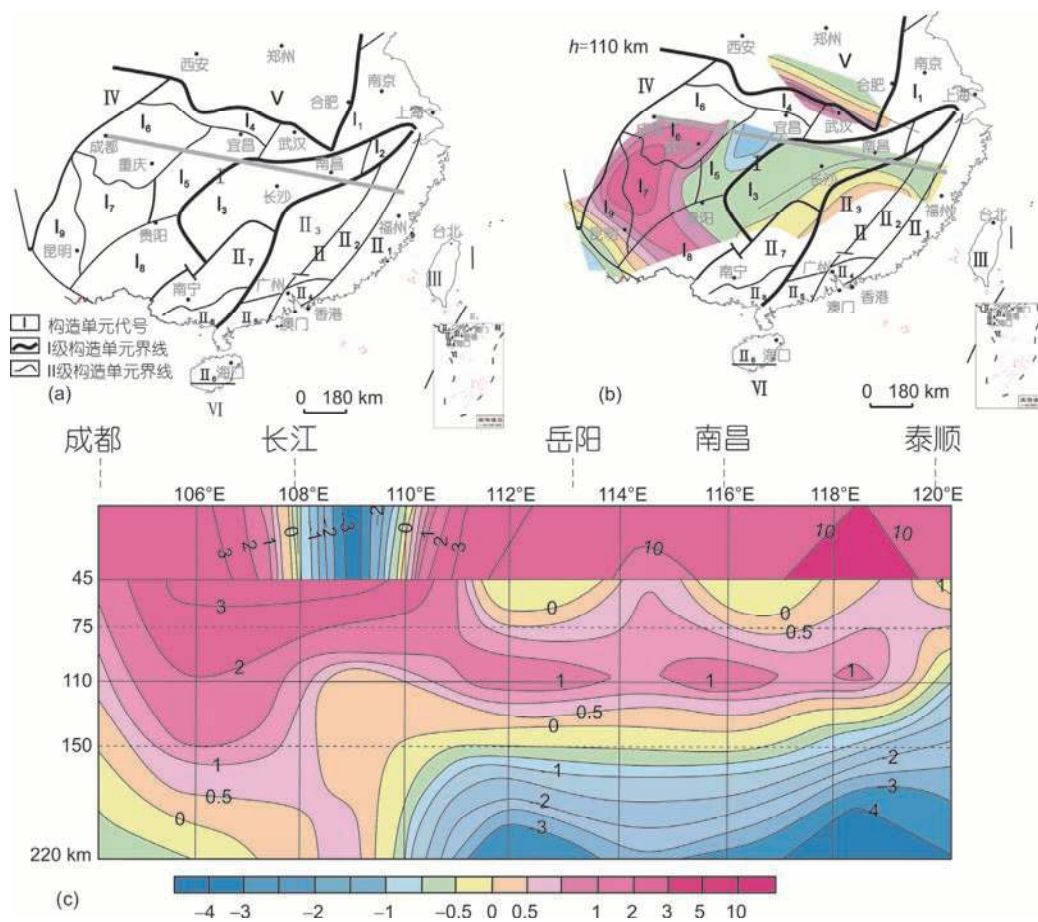


图12 华南东西向层析成像剖面(据文献[218])。 (a) 扬子地块大地构造单元平面图和剖面位置; (b) 110 km深度层析成像; (c) (a)中层析剖面

Figure 12 E-W trending seismic profile across South China (after Ref. [218]). (a) Tectonic units in the Yangtze Block and profile location; (b) tomographic map in 110 km depth; (c) tomographic profile in (a)

构总体也由西向东呈现为3个逐级抬升的台阶状^[218]。从层析结果分析(图12), 中扬子地区岩石圈厚度只有110 km, 并结合岩石学证据, 中扬子深部可能整体未发生拆沉。若中扬子原始岩石圈厚度与上扬子的一样, 那么即使有拆沉, 也可能是不均一的拆沉, 拆沉量也约90 km。刘传周^[215]认为华南内陆地区宁远和道县古生代存在的富集地幔在早侏罗世被完全拆沉(149~154和174~176 Ma), 并被新生地幔所取代, 早侏罗世岩石圈厚度可能小于80 km; 他同时认为, 中生代内陆地区的岩石圈拆沉作用可能与该地区自225 Ma以来大规模的岩石圈伸展作用有关。但本文认为, 伸展很难导致深部拆沉, 地表构造地质也没证明此时存在大规模印支期伸展, 反而是大规模逆冲推覆^[92]。因而, Li等人^[20]据岩浆岩年代学等资料提出的模式更符合构造变形规律, 即华南深部过程可能发生了岩石圈两段式反向拆沉(图13), 其模式中拆沉的

主要对象是俯冲消减的大洋岩石圈(图13(b)), 事件发生在燕山早期190~150 Ma, 导致地表形成大型早中侏罗世挠曲拗陷盆地(图10(a))。但是, 刘传周^[215]揭示, 宁远和道县中生代玄武岩只携带有尖晶石相橄榄岩包体, 其中二辉橄榄岩占绝大多数, 迄今为止尚未有石榴石相橄榄岩包体的报道。因此, 传统的华南地块深部拆沉的不只是大洋岩石圈^[20], 还可能有大陆岩石圈的石榴石相橄榄岩^[215]。结合前文论述, 华南中生代深部构造机制可能为: 印支期一次平板俯冲——燕山早期两段式反向拆沉模式, 拆沉对象应当包括岩石圈底部的部分石榴石相橄榄岩。

至燕山晚期, 传统华南地块内陆的东部广泛发育的断陷盆地、变质核杂岩、碱性玄武岩、A型花岗岩和正长岩, 都被认为是岩石圈伸展的产物。这些过程与董传万等人^[221]认为的深部124~115 Ma的底侵作用可能有关。然而, 变质核杂岩等分布范围远比底

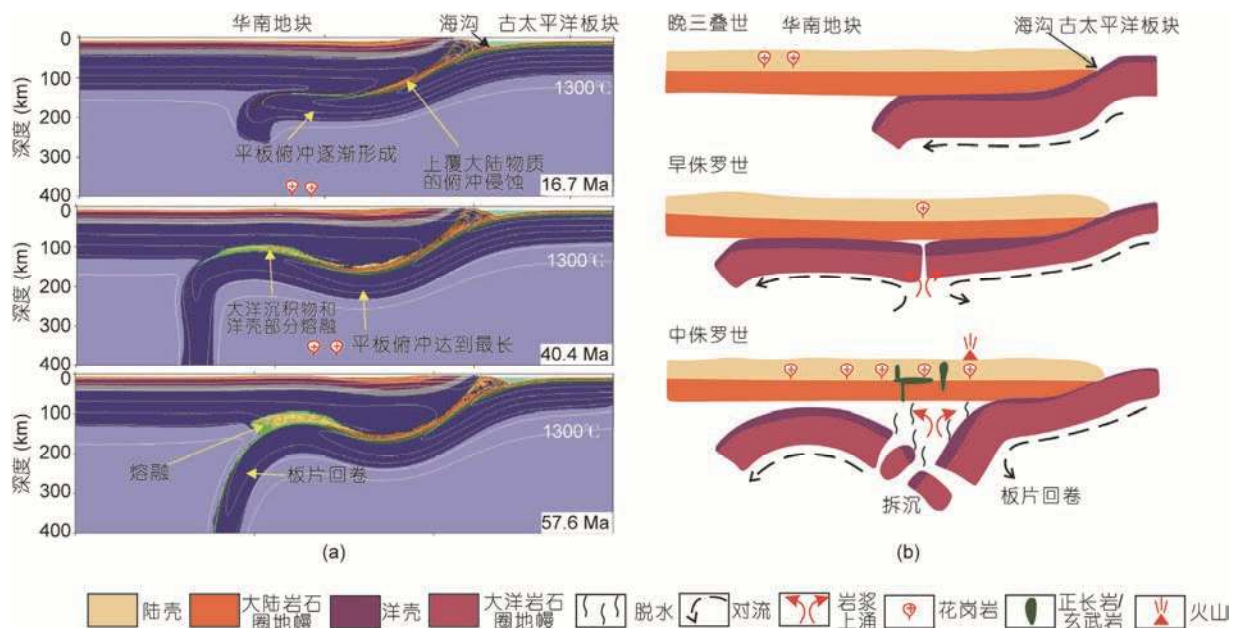


图 13 华南平板俯冲数值模拟((a)据文献[220])和构造-岩浆解释模式((b)据文献[20])
 Figure 13 Numerical modeling of flat plate subduction for South China ((a) after Ref. [220]) and tectono-magmatic explanation ((b) after Ref. [20])

侵范围广泛，不是底侵产物，也不可能是大规模的拆沉所致^[222]，因而，不得不寻求更多机制或多幕机制来解释华南的变质核杂岩成因。当然，强调中国东部的岩石圈减薄过程的热-机械减薄，也不能忽视圈层相互作用过程中热-化学减薄机制，这些复杂的过程导致了燕山期形成酸性大火成岩省和地幔转型^[221]；特别是分层拆沉主要是热、熔体或超临界流体沿着一些圈层间薄弱界面、力学或化学薄弱面先期破坏岩石圈，导致逐层或整体脱离。

此外，刘传周^[215]揭示，华南东部深层不仅燕山期发生了拆沉，而且新生代(20~2 Ma)在东侧华夏地块深部还发生了一次岩石圈拆沉，即新生代时期沿海地区的大规模拉张作用也导致了古老地幔的部分拆沉，同期沿海地区岩石圈厚度约为80~90 km，而该区古生代地幔包体显示当时的岩石圈厚度至少大于110 km，因此，该岩石圈新生代可能发生了至少20~30 km的减薄。然而，构造上这个时期的大规模裂解主要出现在冲绳海槽，这种深、浅部事件在垂向空间上的错位，尚需要未来针对该区洋陆过渡带，开展海陆联测深地震剖面，来精细刻画其深部结构，从而揭示弧后冲绳海槽的开裂模式。不论如何，就目前岩石学、年代学结果表明，华南中新世代深部拆沉作用总体具有由西向东迁移的特点。

4 中生代东亚陆缘对古太平洋板块俯冲的响应

4.1 东亚大汇聚：多向造山与新超大陆聚合起始

早侏罗世早期，受鄂霍茨克洋消减作用影响，东亚北部的俯冲带向南迁移幅度虽相对较小(图4)，但中国北部阴山-燕山造山带开始强烈挤压和收缩。同时，伴随近东西向的古特提斯洋消亡，东亚东部华南板块、华北板块和印支地块也完全拼合，印支期俯冲带跃迁到印支地块南部后，东亚南部的新的特提斯洋沿班公湖-怒江俯冲带俯冲消减，曾发生过基梅里地体群(或拉萨地块)、中特提斯洋板块(注意：西方文件中称新特提斯洋内北侧的大洋板块为中特提斯洋板块，南侧的为新特提斯洋板块，也即印度-欧亚碰撞后改称印度板块^[7])的消减与碰撞，直至150~100 Ma燕山期向北的俯冲带虽局部有变动，如跃迁到拉萨地块以南，但总体位置也基本稳定(图4)。

在这种大背景下，北部边界受到约束——西南侧新特提斯构造域和东南古太平洋构造域的共同作用，可能使中国中部中央造山带经受南北向的陆内俯冲变形和进一步收缩^[223]；特别是，中国西部在新特提斯构造域、中亚构造域近南北向的强大夹持挤压下，阿拉善地块向SEE逃逸^[224]；而中国东部在NW-SE向

的挤压作用下,华北与扬子地块的一些三角形块体分别发生了NE和SW方向的逃逸,这种挤出逃逸过程受到古太平洋板块向西俯冲的俯冲带阻止,此时,古太平洋俯冲带向西迁移幅度相对最大(图4),可以持续到晚白垩世^[225]。因而,东亚洋陆过渡带印支早期近E-W向构造转变为印支晚期-燕山早期NNE向压扭性构造为主,完成了构造方向的转换。

特别是,中-晚侏罗世时期,4亿年前新生的Carolina或Proto-Pangea超大陆经过微小调整后的Pangea超大陆发生裂解^[226-229],南方冈瓦纳大陆的大量裂解碎片再次不断向北半球飘移,使得东亚大陆周邻的古太平洋、鄂霍茨克洋、班公湖-怒江三大洋同时向东亚汇聚(俯冲、碰撞),启动了洲际尺度的燕山早中期变形,形成了3条陆缘构造带。东亚陆内古老的造山带继承原有走向发生多向陆内形变,鄂尔多斯和四川盆地成为东亚多板块汇聚的中心(图1),俯冲板片的脱水、脱碳导致在这两个稳定地块深部也出现地幔熔融上升形成岩体乃至火成碳酸岩侵入。浅表岩石圈板块系统发生大规模聚合,该事件可能成为未来3亿年后的亚美超大陆的聚合起点。因此,中-晚侏罗世是正发生的7亿年超大陆旋回期间的一个重要转变时期,即前一个超大陆Carolina(400 Ma)裂解向后一个新生的亚美超大陆(未来300 Ma)聚合转变期,Pangea只是一个Carolina演化中期的微小调整^[226-229],Pangea的裂解是前一个超大陆Carolina的彻底解体过程,而东亚大汇聚或燕山期形变则意味着亚美超大陆聚合的开始,这就是燕山期形变在大地构造或全球地球动力学上的本质意义。但是,多向板块汇聚是华北克拉通破坏的周边大地构造环境,即华北克拉通破坏的外因。外因是通过内因起作用,燕山运动或燕山期变形、华北克拉通破坏的内因就是前述岩石圈本身和深部复杂的减薄过程,因此,华北克拉通破坏的研究也有助于深入认识超大陆深部的复杂圈层动力学过程。

4.2 东亚成矿大爆发: 相关巨量岩浆作用起止

晚侏罗世-早白垩世的多板块汇聚也诱发了东亚洋陆过渡带的岩浆-成矿大爆发(图9)。距今160~145 Ma之间的燕山中期,古太平洋俯冲带位置与前期相比无明显变化(图4)。晚侏罗世-早白垩世时,福建沿海前白垩世地层和早燕山期花岗岩经历了强烈变质和混合岩化作用^[230],变质程度由陆向海递增,可能

与前人曾推测的早白垩世末滨海断裂带相关。滨海断裂带现今大致在沿现代海域40 m等水深线延伸,沿该断裂带早白垩世末可能有一次微陆块拼合,导致台湾纵谷断裂以西的某个块体与华南地块连成一体。图3(a)表明此时鄂霍茨克洋尚未彻底关闭,其边缘仍为自由的俯冲边界,一些刚性块体在NW向俯冲作用下可向NE向发生挤出。恢复这些东亚陆缘的走滑和挤出、秦岭-大别山造山带和华南造山带的收缩后,得出东亚北部鄂霍茨克-楚科奇带和南部华南福建岛弧之间,也应为西太平洋大陆边缘岩浆弧^[56]。该大陆边缘形成晚于印支早期华北与华南板块的拼合,该大陆边缘160~145 Ma期间发育全区性的规模巨大、时间集中(晚侏罗世-早白垩世)的燕山期陆相火山活动,构成了中国东部巨型火山岩带,且在内陆侧的渤海湾盆地基底中也有同时代安山岩记录。

随后145~125 Ma期间(早白垩世早期),就如东太平洋强烈俯冲形成北美科罗拉多高原一样,中国东部也可能存在一个古太平洋板块俯冲导致地壳增厚的高原。根据同期埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩的时空分布,华北东部可能存在一个高原^[149]或宽大的海岸山脉^[9]。张旗等人^[208]结合古生物地理,进一步划定了其范围,确定是一个高原而非山脉,且中国东部的华北高原存留的时间大致为175~113 Ma(中侏罗世-早白垩世),主要发育在165~125 Ma期间。张旗等人^[208]将同期的中国东部大规模的花岗质(埃达克岩)岩浆事件归因为岩石圈减薄。从上述不同阶段岩浆岩空间分布与古太平洋板块俯冲带相关性分析,华北克拉通破坏或高原垮塌的决定性因素显然确实还是岩石圈热-侵蚀减薄或拆沉、底侵等内在的深部过程,古太平洋板块的向西俯冲可能只是一个外在触发和促进因素^[19]。

有人提出古太平洋板块早期的俯冲是平板俯冲^[20,63,64],以解释宽阔岩浆岩带的展布和早白垩世挤压变形(如华北和华南东部);而用平板俯冲转变为高角度俯冲,来解释127 Ma之后的NW-SE方向的区域性大规模伸展及相关的弥散性变质核杂岩和沉积盆地、构造迁移等^[149],因恰与中国东部大规模岩浆活动结束的时间吻合,故张旗等人^[149]认为127 Ma左右可能是华北高原开始垮塌的时期。但值得注意的是,古太平洋板块向西俯冲和向东回卷过程实际可能自125 Ma或100 Ma以后才开始显著出现,表现在整个中国东部的花岗岩带年龄自NW向SE总体变新的趋

势,可能与俯冲带低角度向高角度转变相关;特别是125~90 Ma后大规模岩浆活动仅限于东部沿海地区^[52,80,149,231],可能是高角度俯冲带后撤,而不再是低角度转变为高角度的过程.然而,这种俯冲后撤尽管可能与大洋台地俯冲拼贴有关,例如,Okhotomorsk大洋台地碰撞拼贴可能导致华北克拉通破坏^[71]或Niu等人^[80]提出的俯冲带堵塞是导致东亚陆缘90 Ma之后岩浆活动发生中断及俯冲后撤的原因,但是,90~70 Ma的岩浆活动间歇期并不局限于这个地区,在整个东亚陆缘都存在,小规模海台的俯冲堵塞也难以导致巨大的古太平洋板块停止或减缓其运动,甚至改变运动方向.

4.3 东亚陆缘俯冲转换:大规模压扭与张扭走滑

(i) 晚侏罗世-早白垩世压扭性拉分盆地群:兴蒙、华北、华南、郯庐.晚中生代期间的古太平洋俯冲过程中,东亚陆缘由早印支期近E-W向构造彻底转变为晚印支期受NNE向构造控制的格局,至燕山期出现一些挤出构造(图3(b)),形成了一系列盆地群,如兴蒙、华北、华南、郯庐等裂谷系.控盆边界断裂不完全是左行走滑,也存在一些右行走滑^[98,131,132,134,178].Sengör和Natal'in^[56]认为Badzhal增生杂岩此时也发生了走滑堆垛作用,沿左行走滑断裂,Ganzha, Mamyn, Turna和Badzhal地质单元依次向北运动,与蒙古-鄂霍茨克缝合线东段发生的东向剪刀式碰撞有关(图3(b)).若消除走滑叠复,日本的地质单元沿Kurosegawa走滑系统向南移,便复原到了图3(a)和(b)中的位置.这个定性板块重建表明:Abukuma(AB)和南Kitakami(SK)为Khakihida弧的一部分,北Khakihida(NK)和Oshima俯冲-增生杂岩与Tamba-Mino(美浓)/Sangun(三郡)/Hida(飞弹)地质单元之间可能存在“日本南部微陆块”的一些岩片,如自由漂移的Anuy“微陆块”可能与Samarka增生杂岩(SM)碰撞.按照这个重建模式,日本一系列地质单元可能与华南东侧相关.但是现今多数板块重建认为,自加里东期或印支期以来,日本有一部分地质单元就始终是处于朝鲜半岛东侧^[66,232-238].图3(b)恢复了秦岭-大别山造山带和华南造山带早白垩世的收缩量^[56],恢复表明东亚陆缘侏罗纪-白垩纪转换时期整体处于俯冲-挤压背景.但东亚陆缘一些内部块体对该俯冲作用的响应却差别非常大,大量断层表现为压扭性,控制了东亚陆缘复杂的局部盆地类型,有张性伸展也有压性挠曲盆地.

晚侏罗世-早白垩世期间,中国东部的西太平洋大陆边缘大量大陆块体的挤出构造(extrusion)或逃逸构造(escape tectonics)是在这种俯冲-挤压背景下出现的一个鲜明构造现象,既发育挤压构造,也发育局部伸展构造,与新生代印度-欧亚板块陆-陆碰撞后期陆内挤出-逃逸相同,走滑挤出作用调节了东亚陆缘的块体相互作用.Shang等人^[239]结合沉积中心迁移、盆地演化、火山岩时空特征等,提出了下扬子地块的NNE向逃逸.对于华北克拉通,Sengör和Natal'in^[56]提出了构造逃逸作用,李三忠等人^[240]将渤海湾盆地深部中生代残留盆地的成因、结构、构造演化与渤鲁地块逃逸过程联系起来,并认为,中生代晚期以兰考-聊城断裂及其北延断裂为界,华北克拉通东部可分为中央华北地块和胶辽-渤鲁地块(相当于唐克东等人^[241]称的渤海地块,或以前的内黄地块),控制了块体的复杂挤出和调整.中国西部于此前的早侏罗世始(燕山早期),松潘-甘孜造山带^[242]、龙门山造山带^[243]已经形成,同时,勉略洋也已经封闭^[244].这些前期构造背景都约束了晚中生代秦岭微地块的运动,加之北部燕山造山带近南北向的挤压,古太平洋(依泽奈崎)板块向北西俯冲,这些周边板块作用在中生代晚期持续存在,导致在胶辽-渤鲁地块的局部地区(如鲁西)出现平行NW向主压应力轴的断陷,由南向北出现挤压性挠曲沉降的合肥盆地和张性的蒙阴、胶莱等NWW或近EW轴向断陷盆地,且该地块东北缘由北向南出现NWW轴向的鸡西、勃利等断陷盆地^[245],类似现今青藏高原南北向裂陷的成因^[246].总体上,这个时期东亚处于大规模压扭性断裂控制的多类型盆地形成的阶段.

早白垩世末期(陆架盆地初期),由于新特提斯洋-印度板块向北俯冲,给欧亚板块一个向北的挤压力,同时,北部北冰洋打开^[247,248],西伯利亚地块南移,使得鄂霍茨克洋关闭,南北部两个动力系统联合作用导致欧亚板块东缘向东蠕散.同时,中国东部由快速NWW向俯冲的依泽奈崎板块俯冲,转变为了中速NWW向的太平洋板块俯冲(图14),俯冲松弛产生东亚陆缘总体NW-SE向的张应力分量,在中国东西部两大动力系统联合作用下,使中国东部处于右旋力偶作用下,实现了压扭构造向张扭构造的转换,为构造性质的转换.结合图9和14还可以发现,华北161和135 Ma强烈火山活动对应依泽奈崎板块降速俯冲,而100 Ma的强烈火山活动,虽然是对应依泽奈崎板

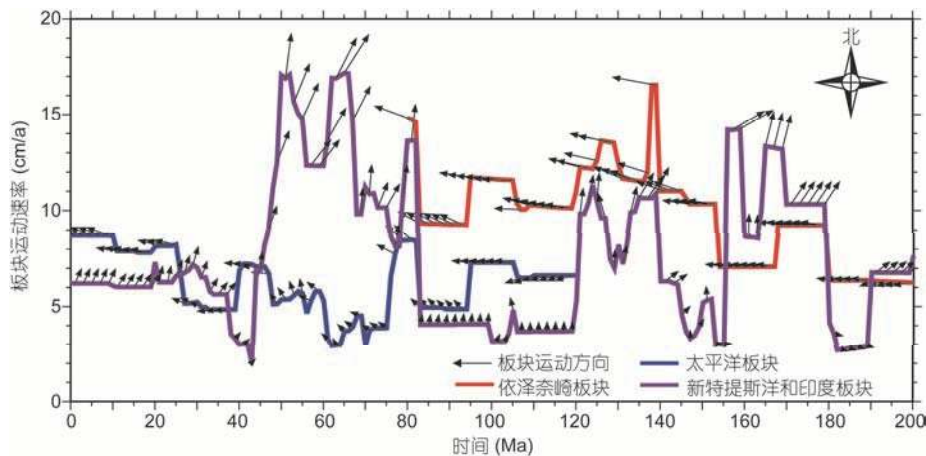


图 14 新特提斯洋-印度板块、太平洋板块、依泽奈崎板块中生代以来相对于下地幔的板块绝对运动速度

Figure 14 Absolute moving velocities relative to lower mantle of the Neo-Tethys to Indian, Pacific and Izanagi plates since Mesozoic

块的加速俯冲,但正好对应此时直接作用在中国东部且比依泽奈崎俯冲速度低了近1倍的太平洋板块,也相当于减速俯冲。减速俯冲往往导致弧后松弛伸展,有利于发生火山喷发。

距今125~100 Ma之间(早白垩世晚期)是挤压构造彻底向伸展构造转换阶段,但东亚陆缘俯冲相关的走滑-拉分构造更为显著,总体体现为张扭性构造为主导。Hilde等人^[34]和Kadarusman等人^[207]认为,135~100 Ma或135~80 Ma期间,三角形的太平洋板块西侧两边界逐步演变为两条近东西走向的平行洋中脊(图11(a)),板块西界以南北走向的转换断层与新特提斯洋板块相分割^[31,249,250],甚至个别转换断层,因两侧洋内岩石圈厚度差异、洋壳运动方向变化、边缘对流等因素,而转变为向西俯冲的俯冲带^[34]。此时,由日本向南延伸的断裂带(冲绳海槽西缘断裂-台湾中央纵谷断裂带)是依泽奈崎(库拉)板块和欧亚板块的边界,也是古太平洋板块的西界。

(ii) 晚白垩世张扭性拉分盆地群: 华北、华南、郯庐。 板块重建表明,晚白垩世(图11),亚洲南部为新特提斯洋,在新特提斯洋与太平洋之间由几条近S-N走向的转换断层(包括东经90°海岭)分割了新特提斯洋和太平洋E-W向的洋中脊,在欧亚板块的东南边缘为太平洋和新特提斯洋相互作用的消减带。

新特提斯洋的大洋岩石圈晚白垩世-古近纪(80~50 Ma)期间快速消减(约90~170 mm/a)到欧亚板块之下(图14),大量岩石圈物质下插到软流圈^[251],随着俯冲的继续,约50~45 Ma期间新特提斯洋洋中脊与欧亚大陆发生碰撞,但由于热的年轻洋中脊在

俯冲板片内绝对高程大且密度小,俯冲相对困难,因而板块俯冲速率骤减(图14);同时,洋中脊作为软流圈物质上涌处,岩石圈厚度最薄,浮力最大,因此,随着洋中脊进入俯冲带,俯冲角度逐渐趋小,水平挤压力逐渐增大,大陆地壳因此强烈褶皱、逆冲、叠覆而增厚。随后,加厚地壳的底部(大于40 km)将熔融出青藏高原内大量的埃达克岩^[149],形成相对刚度较低的软弱层,重力均衡作用下,20 Ma左右出现高原快速隆升。

太平洋板块100~65 Ma之间(晚白垩世)处于总体NW向快速运动的时期(图14),表现为皇帝海岭总体NNW向或近S-N向展布。新生的太平洋板块推动依泽奈崎板块向北快速运动,使其俯冲于阿留申岛弧之下,而东海陆架盆地东侧和南海所处位置由安第斯型活动大陆边缘变为转换型板块边界^[73,210]。此时,太平洋北部分割出库拉板块,南部两条东西向洋中脊之间为太平洋板块(图11)。

45 Ma以来,太平洋板块俯冲方向的偏转(图14)、正向和斜向俯冲的转换交替及其汇聚量的变化,可能导致东亚大陆边缘之下的地幔楔内部对流的复杂性,如反向螺旋型对流(图15,目前这也只是一个动力学假设,需要层析成像技术检验),进而导致陆缘盆地发生时间上的多期阶段性拉张、挤压反转或空间上反转位置的向东迁移、东亚陆缘大规模压扭或张扭控制的走滑拉分等构造现象。这种过程也可能发生在中生代晚期,形成了华北、华南和郯庐3个盆地群^[28,252]。可见,尽管此时东亚东部仍处于时空交错的挤压与伸展并存的构造转换时期,但整体是以张

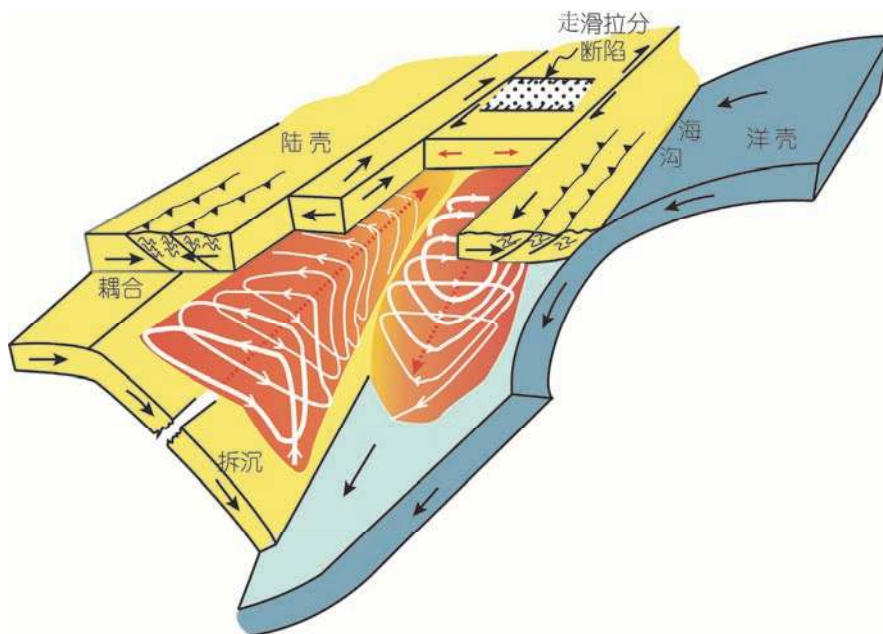


图15 东亚陆缘可能的螺旋式地幔楔对流模式及其与板缘构造耦合模式

Figure 15 Possible mantle wedge spiral convection in the East Asian Continental Margin and its relation of coupling to plate marginal tectonic processes

扭性走滑拉分占主导。

4.4 东亚巨型地形倒转：西太平洋型大陆边缘出现

正如前文所述，东亚洋陆过渡带是一个壳幔-海洋-大气-生态大系统，这一切都可在地形的巨大变化上得到体现。东亚巨型地形倒转在中生代前后共发生了3次。第一次是晚古生代被动陆缘向中生代(200 Ma左右)早期主动陆缘的转换，地形由低变高；第二次是中生代中期(160~135 Ma)华北克拉通破坏导致的华北东部高原的垮塌，地形由高变低；第三次是中生代末期(80~60 Ma)沟-弧体系的安第斯型主动陆缘向新生代西太平洋型沟-弧-盆体系转换，地形进一步变低。巨型地形的高低转换不仅导致地球地表系统的环境巨变，如河流-湖泊-海洋系统、源-渠-汇系统、生态系统、大气环流系统等诸多灾难性变化或系统崩溃的突发性事件；而且也导致地球浅部资源-能源系统发生调整，从地壳深部金属成矿系统到浅部盆地的成烃成藏过程和含油气系统都不断演替。

东亚第一次地形倒转的根本机制可能是与古太平洋板块的俯冲启动以及晚三叠世向大华南地块之下深俯冲的华北克拉通岩石圈板片西向拆沉密切相关。可分为两个阶段：(1) 200~190 Ma期间华北地块

东侧俯冲到大华南地块之下，高压-超高压岩石形成期间相对冷的地幔，因相变和向西的板片拆沉，而逐渐转换为热的富集地幔，导致地形逐渐向西抬起。(2) 190~165 Ma以后，古太平洋板块的俯冲促使地幔楔逐渐变大变宽，并推动向西拆沉的华北俯冲板片或岩石圈下部石榴石橄榄岩板片向西持续撕裂，最终形成华北东部“高原”。华北东部“高原”存留的时间大致为175~113 Ma(中侏罗世-早白垩世)，主要发育在165~125 Ma期间^[208]。张旗等人^[208]揭示该“高原”崛起是从北向南扩展的，并将高原的演化分为萌生期、初期、成熟期、萎缩期、垮塌期、残留期和余脉期7个阶段。其形成时的空间范围和迁移规律与构造形变拓展规律一致。相反，华南因冷的古太平洋板片平板俯冲，降低了华南大陆岩石圈的热量，不会导致大陆岩石圈密度降低，不形成高原或巨型地貌隆升，只有在冷的大洋岩石圈拆沉后，对应的大陆岩石圈上部才出现加热熔融，诱发了时间上滞后的巨量花岗岩浆活动(图13)。

关键是第二次地形倒转机制，在晚侏罗世-早白垩世华北“高原”垮塌期间，地形由高变低，直到部分地区处于海平面以下。该过程依然处于古太平洋板块向欧亚大陆的前进式俯冲背景下(图4)，在中国东部形成了大规模的总体NNE向区域性横压断裂系统，

也相继发育了一系列受这些横压系统约束的局部断陷盆地,从而形成了由拉分盆地(如渤海湾和南黄海盆地深层)、断陷盆地(如松辽盆地)和挠曲盆地或类前陆盆地(如鄂尔多斯盆地、合肥盆地)等多性质局部盆地组成的走滑逃逸盆地群^[51,99,131,134]。但这些东亚的盆地群还总体具有向东跃迁且变年轻的趋势^[27],在华北这可能受华北岩石圈底部的深部拆沉过程向东变新和拆沉层位和拆沉对象的深度向东变浅控制^[28,175](图8)。晚白垩世(或110~70 Ma)(古)太平洋板块以60~70 mm/a的平均速率呈NNW向向欧亚大陆之下俯冲(图14),板块的俯冲角度由早期的10°逐渐变为80°,太平洋板块的高角度潜没和回卷,产生的地幔楔内对流以垂向上涌为特征,使欧亚大陆东部地壳逐渐拉伸、垮塌、变薄,50 Ma以后在东海海域俯冲带后撤显著(图4),中国东部大陆架出现,东海陆架盆地等一系列盆地形成于右行张扭背景下^[206,253,254]。

巨型地形转换几无例外都是大型构造控制,形成的大型地貌几乎都是构造地貌。现今中国地表截然逐级降低的三级地形台阶,深部对应着逐级向上抬升的岩石圈底面。这主要受印度-澳大利亚板块与欧亚板块间的差异碰撞动力系统^[251,255,256]和太平洋板块向西的俯冲动力系统控制^[257,258]。特别是前者可能强迫后者发生俯冲后撤,是东亚第三次地形倒转的根本机制,结果是导致中国西部抬升为高原,而中国东部垮塌为平原和海平面以下的大陆架,出现两个沉降带。其形成也可分为两个阶段:(1) 60~45 Ma期间古太平洋板块与太平洋板块之间的洋中脊俯冲到东亚之下^[31],使得地幔楔加热而上涌,原处于冷地幔楔之上的大规模左行压扭,向新的热地幔楔之上的右行张扭转变或渤海湾等盆地早期的NW-SE向伸展断陷作用,导致早期的张性断陷与随后的拉分裂解,地形整体降低。相反,邻区一些山脉快速隆升,这也得到锆石/磷灰石裂变径迹结果的揭示^[176,177];(2) 30~23 Ma以后,随着太平洋板块老的俯冲板片俯冲,可能导致地幔楔温度整体降低,地幔沉降进而导致浅表沉降的动力地形,使得地表盆地系统进入区域性热沉降阶段。

4.5 华北与大华南燕山期的异同:深部差异构造过程

本文虽然涉及区域不只是东亚洋陆过渡带,也不只是关注了中生代,主要是通过前后时代、东西部

空间的对比,始终围绕华北和华南燕山期变形差异的深部制约因素开展探索,作为结论,本文观点可以归纳为以下几点:

(1) 岩石圈初始厚度和减薄量不同:华北200~150 km减薄到80~60 km,减薄量大;华南150~110 km较薄到80~90 km,减薄量少;因此,破坏程度不同。

(2) 古太平洋板块初始俯冲角度差异: Jarrard^[259]证明俯冲角度与俯冲洋壳的年龄大小无关,因为影响初始俯冲角度的因素还非常多^[260,261],包括上覆板块的绝对运动、俯冲速率、上覆板块是陆壳还是洋壳的属性、俯冲板片的厚度、俯冲板片材料参数、弧后应力场变化、长期俯冲期间俯冲板片与上下地幔边界的相互作用、朝向海沟的运动等。按照近期数值模拟结果^[262,263],冷而厚的上覆岩石圈有利于低角度俯冲或平板俯冲,如中生代的华南及破坏前的华北。本文强调上覆板块岩石圈厚度是个显著差异,其余要素都是次要因素。相对华北岩石圈,一般认为华南岩石圈初始薄,不利于平板俯冲。但是,正如前文所述,华北克拉通初始破坏是因为印支期华北克拉通岩石圈作为下盘沿苏鲁造山带向大华南地块下面俯冲,并于晚三叠世开启了华北克拉通东部第一次向西的拆沉,进而导致华北克拉通东部岩石圈减薄,这是古太平洋板块俯冲促进华北克拉通显著破坏的前提条件。同样在印支期,大华南地块东部作为上盘没有发生岩石圈减薄,因而相对初始减薄的华北克拉通较厚,出现平板俯冲是可能的。在这个前提下,在燕山早期两者同时又受同样的古太平洋板块俯冲作用,进而导致相对较薄的、初始减薄的华北克拉通东部出现相对的高角度俯冲,有利于燕山期分层拆沉进行。值得注意的是,本文基于岩浆岩迁移规律,不反对印支晚期华北地块之下可能发生过古太平洋向西的平板俯冲,但理论和模拟结果并不支持华北下部发生过平板俯冲。类似地,相对较厚的大华南地块东部可出现低角度平板俯冲。

(3) 触发第一次拆沉方向相反:华北地块印支早期向东高角度深俯冲,岩浆向内陆迁移距离有限,只影响相对俯冲-碰撞带较近的区域;华南地块印支期向西低角度平板俯冲,岩浆向内陆迁移较远;因而华北和华南地块的初始破坏机制不同。

(4) 深部拆沉与底侵次数不同:华北3次拆沉,而华南2次拆沉;伴生的底侵次数可能不同,但尚存在争论。可见,两者的破坏过程存在差异。

(5) 深部拆沉方式不同: 华北岩石圈向西分层撕裂, 华南深部总体向东(雪峰山两侧双向)岩石圈相变引发拆沉, 则可解释华南地块晚白垩世西部逆冲与同期东部伸展的差异. 因而, 两者破坏方式和破坏效应也有所差别.

(6) 深部拆沉对象不同: 华北岩石圈向西分层撕裂的是华北大块岩石圈地幔, 华南深部总体(雪峰山东侧)拆沉的岩石圈对象是俯冲的古太平洋大洋岩石圈地幔或部分陆下石榴石相橄榄岩地幔. 可见, 破坏对象和层次也存在显著差异.

这些深部构造过程的差异也都可以用来解释华北地块与华南地块的燕山期的共性, 归纳为以下几点:

(1) 岩浆作用向东渐新——作用于大华南地块的东向俯冲后撤效应等同华北克拉通岩石圈西向拆沉层位的向东渐浅效应;

(2) 宽阔挤压变形带——华南地块之下的西向平板俯冲效应等同华北地块之下的持续西向拆沉效应;

(3) 早期构造变形向西拓展——华北岩石圈的向

西拆沉效应等同华南地块之下古太平洋板块的向西平板俯冲效应;

(4) 华北地块和华南地块燕山期构造形迹皆以NNE向为主——NNE走向形迹并不能说明华北和华南地块处于古太平洋板块NWW向俯冲作用的背景下, 而是反映大洋板块和大陆板块间相互作用的总效应是NWW向挤压作用使大陆形变, 因为大洋板块运动方向可能完全不同于上盘大陆岩石圈板块变形的应力场方向, 且这种效应实际还可能说明的是大陆边缘或俯冲带总方向是NNE向, 是边界效应; 东亚地区华北和华南地块南北部的边界效应实际也有体现, 主要表现在走向近东西的中央造山带和阴山-燕山造山带的中生代陆内造山;

(5) 中国东部地形的3次倒转——首次与古太平洋板块俯冲启动, 被动向主动的陆缘类型转换有关; 第2次地形倒转与岩石圈拆沉程度和方式有关; 第3次与古太平洋板块俯冲到华北和华南地块之下的俯冲角度逐渐变陡和俯冲后撤有关.

致谢

本文成文过程中得到了很多研究生的支持, 他们协助查阅了大量文献. 由于东亚洋陆过渡带是一个矛盾的统一体, 研究过程不仅要考虑时与空变换, 还要融合先与后事件、主与次构造、压与张转换、降与隆变迁、左与右运动、进与退俯冲、东与西作用、上与下圈层、厚与薄差异的“矛盾”问题, 因而本文未能彻底解决这些长期面临的科学难题, 未来的深入分析还需要使得地质现象和过程各得其所、矛盾统一、协调一致, 彻底解决这些问题尚需要时日和大家努力; 作为综述性文章, 可能有很多不尽完美之处, 引用也不全面, 错误也在所难免, 抛砖引玉, 很多观点只是一家之言, 权且作为讨论, 请大家批评指正.

参考文献

- 1 Maruyama S, Santosh M, Zhao D P. Superplume, supercontinent, and postperovskite: Mantle dynamics and anti-plate tectonics on the core-mantle boundary. *Gondwana Res*, 2007, 11: 7–37
- 2 Maruyama S, Hasegawa A, Santosh M, et al. The dynamics of big mantle wedge, magma factory, and metamorphic metasomatic factory in subduction zones. *Gondwana Res*, 2009, 16: 414–430
- 3 Li S Z, Santosh M, Zhao G C, et al. Intracontinental deformation in a frontier of super-convergence: A perspective on the tectonic milieu of the South China Block. *J Asian Earth Sci*, 2012, 49: 313–329
- 4 Li S Z, Suo Y H, Liu X, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2012, 32: 55–78 [李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32: 55–78]
- 5 Zhao D P, Maruyama S, Omori S. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: Insight from seismic tomography and mineral physics. *Gondwana Res*, 2007, 11: 120–131
- 6 Liu X, Zhao D P, Li S Z, et al. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications. *Earth Planet Sci Lett*, 2017, 464: 166–174
- 7 Zahirovic S, Matthews K J, Flament N, et al. Tectonic evolution and deep mantle structure of the eastern Tethys since the latest Jurassic. *Earth-Sci Rev*, 2016, 162: 293–337
- 8 Safonova I. Juvenile versus recycled crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from ocean plate stratigraphy, blueschist belts and intra-oceanic arcs. *Gondwana Res*, 2017, 47: 6–27
- 9 Dmitrienko L, Wang P C, Li S Z, et al. Meso-Cenozoic evolution of earth surface system under the East Asian Tectonic Superconvergence

- (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2017, 4: 34–64 [Dmitrienko L, 王鹏程, 李三忠, 等. 东亚大汇聚与中-新生代地球表层系统演变. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 4: 34–64]
- 10 Hua R M, Mao J W. A preliminary discussion on the Mesozoic metalliferous explosion in East China (in Chinese). *Miner Deposits*, 1999, 18: 300–307 [华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 1999, 18: 300–307]
 - 11 Deng J, Wang Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework. *Gondwana Res*, 2016, 36: 219–274
 - 12 Tao K Y, Mao J R, Xing G F, et al. Strong Yanshanian volcanic-magmatic explosion in East China (in Chinese). *Miner Deposits*, 2007, 18: 316–322 [陶奎元, 毛建仁, 邢光福, 等. 中国东部燕山期火山-岩浆大爆发. *矿床地质*, 2007, 18: 316–322]
 - 13 Wang T, Zheng Y D, Zhang J J, et al. Pattern and kinematic polarity of late Mesozoic extension in continental NE Asia: Perspectives from metamorphic core complexes. *Tectonics*, 2011, 30: 1–27
 - 14 Lin W, Faure M, Chen Y, et al. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan-Yanshan orogenic belt Part I: Structural analyses and geochronological constraints. *Gondwana Res*, 2013, 23: 54–77
 - 15 Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis. *Earth-Sci Rev*, 2014, 134: 98–136
 - 16 Zheng Y F, Wu F Y. Growth and reworking of cratonic lithosphere (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1945–1949 [郑永飞, 吴福元. 克拉通岩石圈的生长和再造. *科学通报*, 2009, 54: 1945–1949]
 - 17 Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. Destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1565–1587 [朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 1135–1159]
 - 18 Zhu R X, Yang J H, Wu F Y. Timing of destruction of the North China Craton. *Lithos*, 2012, 149: 51–60
 - 19 Wu F Y, Xu Y G, Zhu R X, et al. Thinning and destruction of the cratonic lithosphere: A global perspective. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 2878–2890 [吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 克拉通岩石圈减薄与破坏. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 2358–2372]
 - 20 Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 2007, 35: 179–182
 - 21 Keller G, Sahni A, Bajpai S. Deccan volcanism, the KT mass extinction and dinosaurs. *J Biosci*, 2009, 34: 709–728
 - 22 Liu Z F, Hu X M. Extreme climate events in the Cretaceous and Paleogene (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2003, 18: 681–690 [刘志飞, 胡修棉. 白垩纪至早第三纪的极端气候事件. *地球科学进展*, 2003, 18: 681–690]
 - 23 Zachos J C, Röhl U, Schellenberg S A, et al. Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum. *Science*, 2005, 308: 1611–1165
 - 24 Schlanger S O, Jenkyns H C. Cretaceous oceanic anoxic events: Causes and consequences. *Geol Mijnbouw*, 1976, 55: 179–184
 - 25 Jenkyns H C. Cretaceous anoxic events: From continents to oceans. *J Geol Soc London*, 1980, 137: 171–188
 - 26 Huang Y J, Wang C S, Gu J. Cretaceous oceanic anoxic events: Research progress and forthcoming prospects (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 82: 21–30 [黄永建, 王成善, 顾健. 白垩纪大洋缺氧事件: 研究进展与未来展望. *地质学报*, 2008, 82: 21–30]
 - 27 Dmitrienko L, Li S Z, Cao X Z, et al. Large-scale morphotectonics of the ocean-continent transition zone between the Western Pacific Ocean and the East Asian Continent: A link of deep process to the Earth's surface system. *Geol J*, 2016, 51(Suppl): 263–285
 - 28 Suo Y H, Li S Z, Cao X Z, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 249–267 [索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其所记录的大洋板块俯冲过程. *地学前缘*, 2017, 24: 249–267]
 - 29 Zhao S J, Li S Z, Suo Y H, et al. Structure and formation mechanism of Yellow Sea Basin (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 239–248 [赵淑娟, 李三忠, 索艳慧, 等. 黄海盆地构造特征及形成机制. *地学前缘*, 2017, 24: 239–248]
 - 30 Jiang S H, Gao S, Li S Z, et al. Gravity-magnetic anomaly and tectonic unites in West Pacific Continent-Ocean Connection Zone (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 152–170 [姜素华, 高高, 李三忠, 等. 西太平洋洋-陆过渡带重磁异常与构造格架. *地学前缘*, 2017, 24: 152–170]
 - 31 Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Long-term sealevel fluctuations driven by ocean basin dynamics. *Science*, 2008, 319: 1357–1362
 - 32 Jiang Y Q. Analysis for the main factors controlling sedimentation in East China Sea Basin (in Chinese). *Mar Origin Pet Geol*, 1994, 1: 68–75 [姜涌泉. 浅析东海陆架盆地沉积作用的主要控制因素. *海相油气地质*, 1994, 1: 68–75]
 - 33 van der Meer D G, Torsvik T H, Spakman W, et al. Intra-Panthalassa Ocean subduction zones revealed by fossil arcs and mantle structure. *Nat Geosci*, 2012, 5: 215–219
 - 34 Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the western Pacific and its margin. *Tectonophysics*, 1977, 38: 145–165
 - 35 Seton M, Müller R D, Zahirovic S, et al. Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma. *Earth-Sci Rev*, 2012, 113: 212–270
 - 36 Wan T F. *Essentials of Chinese Geotectology* (in Chinese). Beijing: Geological Press, 2007. 1–287 [万天丰. *中国大地构造学纲要*. 北京: 地质出版社, 2007. 1–287]

- 37 Li S Z, Zhao S J, Yu S, et al. Tectonic transition and plate reconstructions of the East Asian Continental Margin (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2013, 33: 65–94 [李三忠, 赵淑娟, 余珊, 等. 东亚大陆边缘的板块重建与构造转换. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33: 65–94]
- 38 Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2013, 29: 339–353 [许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约. *岩石学报*, 2013, 29: 339–353]
- 39 Tang J, Xu W L, Wang F. Rock associations and their spatial-temporal variation of the Early Mesozoic igneous rocks in the NE Asia: Constraints on the initial subduction timing of the Paleo-Pacific Plate (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2016, 35: 1181–1194 [唐杰, 许文良, 王枫. 东北亚早中生代火成岩组合的时空变异: 对古太平洋板块俯冲开始时间的制约. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35: 1181–1194]
- 40 Liu K, Zhang J J, Ge M H, et al. Mesozoic subduction of the Paleo-Pacific plate along the eastern margin of the Xing-Meng Orogenic Belt (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2016, 35: 1098–1108 [刘恺, 张进江, 葛茂卉, 等. 中生代兴蒙造山带东缘的古太平洋板块俯冲. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35: 1098–1108]
- 41 Wang P C, Zhao S J, Li S Z, et al. The styles and dynamics of thrust in the south of the Middle-Lower Yangtze River area, China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2015, 31: 230–244 [王鹏程, 赵淑娟, 李三忠, 等. 长江中下游南部逆冲变形样式及其机制. *岩石学报*, 2015, 31: 230–244]
- 42 Lan H Y, Li S Z, Li X Y, et al. Indosinian deformation in eastern North China: Implications for continental deep subduction polarity (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 4: 185–199 [兰浩圆, 李三忠, 李玺瑶, 等. 华北东部印支期变形特征: 对大陆深俯冲极性的启示. *地质前缘*, 2017, 4: 185–199]
- 43 Zhou J B, Cao J L, Wilde S A, et al. Paleo-Pacific subduction-accretion: Evidence from geochemical and U-Pb zircon dating of the Nadanhada accretionary complex, NE China. *Tectonics*, 2014, 33: 2444–2466
- 44 Zhou J B, Li L. The Mesozoic accretionary complex in Northeast China: Evidence for the accretion history of Paleo-Pacific subduction. *J Asian Earth Sci*, 2017, 145: 91–100
- 45 Sun M D, Xu Y G, Wild S A, et al. The Permian Dongfanghong island-arc gabbro of the Wandashan Orogen, NE China: Implications for Paleo-Pacific subduction. *Tectonophysics*, 2015, 659: 122–136
- 46 Hu S X, Sun J G. On several important geological problems in Jiangsu Province (in Chinese). *J Geol*, 1999, 23: 193–196 [胡受奚, 孙景贵. 涉及江苏省的几个重大地质问题. *地质学刊*, 1999, 23: 193–196]
- 47 Zhang Q. Is the Mesozoic magmatism in eastern China related to the westward subduction of the Pacific plate (in Chinese)? *Acta Petrol Mineral*, 2013, 32: 113–128 [张旗. 中国东部中生代岩浆活动与太平洋板块向西俯冲有关吗? *岩石矿物学杂志*, 2013, 32: 113–128]
- 48 Xu K Q, Sun N, Wang D Z, et al. Geological and Mineralization Relations of South China Granitoids (in Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1984. 1–20 [徐克勤, 孙乃, 王德滋, 等. 华南花岗岩地质和地矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社, 1984. 1–20]
- 49 Hu S X, Zhao Y Y, Hu Z H, et al. Evolution and development of tectonics and magmatism at the active continental margin of the East China during Mesozoic and Cenozoic (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1994, 10: 370–381 [胡受奚, 赵乙英, 胡志宏, 等. 中国东部中生代活动大陆边缘构造-岩浆作用演化和发展. *岩石学报*, 1994, 10: 370–381]
- 50 Li S Z, Liu J Z, Zhao G C, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: A case of Jiaodong and Liaodong Peninsula (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 20: 633–646 [李三忠, 刘建忠, 赵国春, 等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例. *岩石学报*, 2004, 20: 633–646]
- 51 Li S Z, Zhang G W, Zhou L H, et al. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2011, 18: 79–107 [李三忠, 张国伟, 周立宏, 等. 中生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲. *地质前缘*, 2011, 18: 79–107]
- 52 Mao J R, Xing G F, Ye H M, et al. Meso-Cenozoic Magmatism and Mineralization in Southeast China and Adjacent Areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 2013. 1–524 [毛建仁, 邢光福, 叶海敏, 等. 中国东南部及邻区中生代岩浆作用与成矿. 北京: 科学出版社, 2013. 1–524]
- 53 Shu L S, Zhou W Q, Shi Y S, et al. Geochronology of the high-pressure metamorphic blueschist in the eastern section of the Jiangnan Orogen (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1993, 38: 1879–1882 [舒良树, 周围庆, 施央申, 等. 江南造山带东段高压变质蓝片岩及其地质时代研究. *科学通报*, 1993, 38: 1879–1882]
- 54 Zhang L, Zhang G X, Wang L L. Distribution of Mesozoic Strata in the North of the South China Sea and the Prospectives of Oil and Gas Resources (in Chinese). Beijing: Geological Press, 2014. 1–358 [张莉, 张光学, 王嘹亮. 南海北部中生界分布及油气资源前景. 北京: 地质出版社, 2014. 1–358]

- 55 Huang Z G. Evolution of Plate Tectonics and Environment in Taiwan (in Chinese). Beijing: Maritime Press, 1995. 1–210 [黄镇国. 台湾板块构造与环境演变. 北京: 海洋出版社, 1995. 1–210]
- 56 Sengör A M C, Natal'in B A. Paleotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: Yin A, Harrison M, eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. 487–614
- 57 Zhou J B, Wilde S A. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1365–1377
- 58 Shao J A, Tang K D. The ophiolite mélange in Kaishantun Jilin Province, China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1995, (Suppl): 212–220 [邵济安, 唐克东. 吉林省延边开山屯地区蛇绿混杂岩. 岩石学报, 1995, (增刊): 212–220]
- 59 Isozaki Y, Aoki K, Nakama T, et al. New insight into a subduction-related orogen: A reappraisal of the geotectonic framework and evolution of the Japanese Islands. *Gondwana Res*, 2010, 8: 82–105
- 60 Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia. *Earth-Sci Rev*, 2017, doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.011
- 61 Li S Z, Jahn B M, Zhao S J, et al. Triassic southeastward subduction of North China Block to South China Block: Insights from new geological, geophysical and geochemical data. *Earth-Sci Rev*, 2017, 166: 270–285
- 62 Li X H, Zhou H W, Ding S J, et al. The Hainan mid-ocean ridge-type metamorphic mafic rocks: The remnants of the Paleo-Tethys oceanic crust (in Chinese)? *Chin Sci Bull*, 2000, 45: 84–89 [李献华, 周汉文, 丁式江, 等. 海南岛洋中脊型变质基性岩: 古特提斯洋壳的残片? 科学通报, 2000, 45: 84–89]
- 63 Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearings on the destruction of the eastern North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2012, 47: 80–93
- 64 Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Mesozoic Basins in eastern China and their Bearings on the deconstruction of the North China Craton. *J Asian Earth Sci*, 2012, 47: 64–79
- 65 Li S Z, Wang T, Jin C, et al. Features and causes of indosinian intracontinental structures in the Xuefengshan Precambrian basement and its neighboring regions (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2011, 41: 93–105 [李三忠, 王涛, 金宠, 等. 雪峰山基底隆升带及其邻区印支期陆内构造特征与成因. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41: 93–105]
- 66 Guo R H, Li S Z, Suo Y H, et al. Indentation of North China Block into greater South China Block and Indosinian orocline (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 171–184 [郭润华, 李三忠, 索艳慧, 等. 华北地块楔入大华南地块和印支期弯山构造. 地学前缘, 2017, 24: 171–184]
- 67 Altis S. Tectonic stress state in NE Japan as part of the Okhotsk plate. *Tectonophysics*, 2001, 339: 311–329
- 68 Uchida N, Nakajima J, Hasegawa A, et al. What controls interplate coupling? Evidence for abrupt change in coupling across a border between two overlying plates in the NE Japan subduction zone. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 283: 111–121
- 69 Safonova I, Santosh M. Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondwana Res*, 2014, 25: 126–158
- 70 Porter T M. The geology, structure and mineralisation of the Oyu Tolgoi porphyry copper-gold-molybdenum deposits, Mongolia: A review. *Geosci Front*, 2016, 7: 375–407
- 71 Yang Y T. An unrecognized major collision of the Okhotomorsk Block with East Asia during the Late Cretaceous, constraints on the plate reorganization of the Northwest Pacific. *Earth-Sci Rev*, 2013, 126: 96–115
- 72 Geng X S, Wan Y S, Li S W, et al. A preliminary discussion on the evolution of the coastal zone in northern Jiangsu and the dynamic model of the northern Jiangsu Shoal (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1983, 5: 62–70 [耿秀山, 万延森, 李善为, 等. 苏北海岸带的演变过程及苏北浅滩动态模式的初步探讨. 海洋学报, 1983, 5: 62–70]
- 73 Liu G D. Geological and Geophysical Atlas of China's Sea Area and Neighbourhood (in Chinese). Beijing: Science Press, 1993. 1–94 [刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理图集. 北京: 科学出版社, 1993. 1–94]
- 74 Wu G Y, Yano T. Tectonic framework and Meso-Cenozoic evolution of the East Asian continental margin (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2007, 26: 787–799 [吴根耀, 矢野孝雄. 东亚大陆边缘的构造格架及其中-新生代演化. 地质通报, 2007, 26: 787–799]
- 75 Liu H L, Yan P, Zhang B Y, et al. Pre-Cenozoic basements on the South China Sea and Eastern Tethyan Realm (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2004, 24: 16–28 [刘海龄, 阎贫, 张伯友, 等. 南海前新生代基底与东特提斯构造域. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24: 16–28]
- 76 Liu H L, Yan P, Liu Y C. Evidence of the Qiongnan Suture in the northern margin of the South China Sea (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2006, 51: 92–101 [刘海龄, 阎贫, 刘迎春, 等. 南海北缘琼南缝合带的存在. 科学通报, 2006, 51: 92–101]
- 77 Meyerhoff A. Surge-tectonic evolution of southeastern Asia: A geohydrodynamics approach. *J Southeast Asian Earth Sci*, 1995, 12: 145–247
- 78 Kinoshita O. Possible manifestations of slab window magmatism in Cretaceous southwest Japan. *Tectonophysics*, 2002, 344: 1–13

- 79 Sun W D, Ding X, Hu Y H, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the West Pacific. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533–542
- 80 Niu Y L, Liu Y, Xue Q Q, et al. Exotic origin of the Chinese continental shelf: New insights into the tectonic evolution of the western Pacific and eastern China since the Mesozoic. *Sci Bull*, 2015, 60: 1598–1616
- 81 Zhai M G. Comparative study of geology in North China and Korean Peninsula: Research advances and key issues (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 2915–2932 [翟明国. 朝鲜半岛与华北地质之对比研究: 进展与问题. *岩石学报*, 2016, 32: 2915–2932]
- 82 Wang H Z, Liu B P. The outline of Palaeogeography since Mesoproterozoic in China (in Chinese). *J Stratigr*, 1981, 5: 77–89 [王鸿祯, 刘本培. 中国中元古代以来古地理发展的轮廓. *地层学杂志*, 1981, 5: 77–89]
- 83 Wang H Z, Yang S N, Li S T. Mesozoic and Cenozoic basin formation in East China and adjacent region and development of the continental margin (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1983, 3: 213–222 [王鸿祯, 杨森楠, 李思田. 中国东部及邻区中、新生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展. *地质学报*, 1983, 3: 213–222]
- 84 Qiu Y, Wang L F, Huang K W. Mesozoic and Cenozoic Sedimentary Basins in China Seas (in Chinese). Beijing: Geological Press, 2016. 1–223 [邱燕, 王立飞, 黄文凯. 中国海域中新代沉积盆地. 北京: 地质出版社, 2016. 1–223]
- 85 Yoshida M. A new conceptual model for whole mantle convection and the origin of hotspot plumes. *J Geodyn*, 2014, 78: 32–41
- 86 Matthews K J, Maloney K T, Zahirovic S, et al. Global plate boundary evolution and kinematics since the late Paleozoic. *Glob Planet Change*, 2016, 146: 226–250
- 87 Shu L S, Yin H, Faure M, et al. Mesozoic intracontinental underthrust in the SE margin of the North China Block: Insights from the Xu-Huai thrust-and-fold belt. *J Asian Earth Sci*, 2016, 141: 161–173
- 88 Liao C Z, Zhang Y, Wen C S. Structural styles of the eastern boundary zone of the Ordos Basin and its regional tectonic significance (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2007, 81: 466–474 [廖昌珍, 张岳, 温长顺. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义. *地质学报*, 2007, 81: 466–474]
- 89 Li S Z, Guo L L, Xu L Q, et al. Coupling and transition of Meso-Cenozoic intraplate deformation between the Taihang and the Qinling Mountains. *J Asian Earth Sci*, 2015, 114: 188–202
- 90 Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, et al. Two-stage Triassic exhumation of HP-UHP terranes in the western Dabie orogen of China: Constraints from structural geology. *Tectonophysics*, 2010, 490: 267–293
- 91 Li S Z, Kusky T M, Zhao G C, et al. Thermochronological constraints on Two-stage extrusion of HP/UHP terranes in the Dabie-Sulu orogen, east-central China. *Tectonophysics*, 2011, 504: 25–42
- 92 Jin C, Li S Z, Wang Y J, et al. Diachronous and progressive deformation during the Indosinian-Yanshanian movements of the Xuefeng Mountain intracontinental composite tectonic system (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2009, 30: 598–607 [金宠, 李三忠, 王岳军, 等. 雪峰山陆内复合构造系统印支-燕山期构造穿时递进特征. *石油与天然气地质*, 2009, 30: 598–607]
- 93 Wu Q, Li S Z, Liu X, et al. Characteristics of the Yanshanian chevron anticline-like folds in the southern part of Shanxi Province (in Chinese). *Geotect Metall*, 2012, 36: 483–489 [吴奇, 李三忠, 刘鑫, 等. 山西南部燕山期类隔挡式褶皱构造特征. *大地构造与成矿学*, 2012, 36: 483–489]
- 94 Wang C L, Yan D P, Zhang B, et al. Structural style and deformational characteristics of the thick-skinned thrust belt in the western Xuefeng Mountain (in Chinese). *Geoscience*, 2011, 25: 1021–1031 [汪昌亮, 颜丹平, 张冰, 等. 雪峰山西部中生代厚皮逆冲推覆构造岩石与变形特征研究. *现代地质*, 2011, 25: 1021–1031]
- 95 Zhao C Y. Developments in petroleum geology: Review and look ahead (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 1998, 19: 8–14 [赵重远. 石油地质学发展: 反思和展望. *石油与天然气地质*, 1998, 19: 8–14]
- 96 Li Z H, Dong S W, Qu H J. Sedimentary evidence of Jurassic Orogenic Process and key time limit on the north margin of North China Craton (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2014, 44: 1553–1574 [李振宏, 董树文, 渠洪杰. 华北克拉通北缘侏罗纪造山过程及关键时限的沉积证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44: 1553–1574]
- 97 Xie D N, He M X, Zhou L F, et al. Characteristics of overthrust structures on northern edge of East Qinling-Dabie orogenic belt and hydrocarbon potentials (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2006, 27: 48–55 [解东宁, 何明喜, 周立发, 等. 东秦岭-大别造山带北缘逆冲推覆构造特征及油气前景. *石油与天然气地质*, 2006, 27: 48–55]
- 98 Liu J Z, Li S Z, Zhou L H, et al. Mesozoic tectonics and basin distribution in the Eastern North China Plate (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2004, 24: 45–54 [刘建忠, 李三忠, 周立宏, 等. 华北板块东部中生代构造演化与盆地格局. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24: 45–54]
- 99 Sun X M, Wang P J, Hao F J. Space-time distribution features, migration regularities and genetic types of regional fault system of Meso-Cenozoic in the central section of epicontinent of the East China (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2005, 35: 554–563 [孙晓猛, 王璞珺, 郝福江, 等. 中国东部陆缘中区中-新生代区域断裂系统时空分布特征、迁移规律及成因类型. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35: 554–563]

- 100 Dong S W, Zhang Y Q, Zhang F Q, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution. *J Asian Earth Sci*, 2015, 114: 750–770
- 101 Zhang Y Q, Li J L, Zhang T, et al. Cretaceous to Paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jiaolai Basin and the contiguous areas of the Shandong Peninsula (North China) and its geodynamic implications (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 82: 1229–1257 [张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶莱盆地及其邻区白垩纪-古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义. *地质学报*, 2008, 82: 1229–1257]
- 102 Zhu G, Niu M L, Liu G S, et al. Structural, magmatic and sedimentary events of the Tan-Lu Fault Belt during its early Cretaceous strike-slip movement (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 76: 325–334 [朱光, 牛漫兰, 刘国生, 等. 郯庐断裂带早白垩世走滑运动中的构造、岩浆、沉积事件. *地质学报*, 2008, 76: 325–334]
- 103 Han G Q, Liu Y J, Wen Q B, et al. The Characteristics of Structural Deformation for the Lingxia Ductile shear zone of Nenjing-Balihan Fault Belt in Northeastern China (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2009, 39: 397–405 [韩国卿, 刘永江, 温泉波, 等. 嫩江-八里罕断裂带岭下韧性剪切带变形特征. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39: 397–405]
- 104 Liu B R, Li W, Jia J, et al. Extensional detachment structure in Galashan, Northern Great Xing'an Ranges, NE China (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2014, 44: 1142–1152 [刘勃然, 李伟, 贾杰, 等. 大兴安岭北段嘎拉山伸展滑脱构造. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44: 1142–1152]
- 105 Gu C C, Zhu G, Zhai M J, et al. Features and origin time of Mesozoic strike-slip structures in the Yilan-Yitong Fault Zone (in Chinese). *Sci Chin Earth Sci*, 2016, 46: 1579–1601 [顾承串, 朱光, 翟明见, 等. 依兰-伊通断裂带中生代走滑构造特征与起源时代. *中国科学: 地球科学*, 2016, 46: 1579–1601]
- 106 Zhu G, Wang Y S, Liu G S, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of strike-slip motion on the Tan-Lu fault zone, East China. *J Struct Geol*, 2005, 27: 1379–1398
- 107 Zhang Y Q, Li J L, Zhang T, et al. Late Mesozoic kinematic history of the Muping-Jimo fault zone in Jiaodong Peninsula, Shandong Province, East China (in Chinese). *Geol Rev*, 2007, 53: 289–300 [张岳桥, 李金良, 张田, 等. 胶东半岛牟平-即墨断裂带晚中生代运动学转换历史. *地质论评*, 2007, 53: 289–300]
- 108 Shi J J. Dividing of deformation and metamorphic stages and determination of its ages in Changle-Nan'ao Tectonic Zone (in Chinese). *Geol Fujian*, 2011, 30: 189–199 [石建基. 长乐-南澳构造带变质变形期次划分及时代厘定. *福建地质*, 2011, 30: 189–199]
- 109 Wu H Y, Zhang L C, Wan B, et al. Re-Os and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Xilamulun metallogenic belt, NE China, and constraints on mineralization events. *Miner Depos*, 2011, 46: 171–185
- 110 Ren X M, Zhu W B, Zhu X Q, et al. Mesozoic-Cenozoic uplift-exhumation history in Lüliangshan Area of Shanxi: Evidence from apatite fission track (in Chinese). *J Earth Sci Environ*, 2015, 37: 63–73 [任星民, 朱文斌, 朱晓青, 等. 山西吕梁山地区中-新生代隆升剥露过程: 磷灰石裂变径迹证据. *地球科学与环境学报*, 2015, 37: 63–73]
- 111 Wu H H, Hu D G, Wu X W, et al. Mesozoic-Cenozoic uplift and denudation of northern Da Hinggan Mountains: Evidence from apatite fission track data (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2016, 35: 2058–2062 [吴环环, 胡道功, 吴学文, 等. 大兴安岭北段中新生代隆升与剥露历史的磷灰石裂变径迹证据. *地质通报*, 2016, 35: 2058–2062]
- 112 Feng Y L, Yuan W M, Hao N N, et al. Denudation and conservation history of local district in Jiapigou gold deposit, Huadian Country, Jilin Province (in Chinese). *Geol Rev*, 2015, 61: 109–120 [冯云磊, 袁万明, 郝娜娜, 等. 辉吉林桦甸市夹皮沟本区金矿剥露历史和矿床保存变化——来自磷灰石裂变径迹年代学证据. *地质论评*, 2015, 61: 109–120]
- 113 Li Z B, Wang Y J, Zhang Y Z, et al. Meso-Cenozoic uplifting of south Taihang Mountains: Constraints from apatite fission track data (in Chinese). *Geotect Metall*, 2015, 39: 460–469 [李庶波, 王岳军, 张玉芝, 等. 南太行山中新生代隆升过程: 磷灰石裂变径迹证据. *大地构造与成矿*, 2015, 39: 460–469]
- 114 Zhang P, Zhou Z Y, Xu C H. Thermo-tectonic history of the Lower Yangtze area since Late Cretaceous: Evidence from apatite fission track analysis of sandstones from Pukou Formation (in Chinese). *Offshore Oil*, 2009, 4: 26–32 [张沛, 周祖翼, 许长海. 苏皖下扬子区晚白垩世以来的构造-热历史: 浦口组砂岩磷灰石裂变径迹证据. *海洋石油*, 2009, 4: 26–32]
- 115 Liu W H, Zhang J, Li W T, et al. Metallogenic depth, post-mineralization uplift and denudation of porphyry-like type iron deposits in Ningwu, Luzong Basins: Evidence from apatite fission track (in Chinese). *Earth Sci*, 2012, 37: 966–980 [刘文浩, 张均, 李婉婷, 等. 宁芜、庐枞盆地玢岩铁矿成矿深度及成矿后抬升、剥蚀情况: 来自磷灰石裂变径迹的证据. *地球科学*, 2012, 37: 966–980]
- 116 Liu Z J, Wang J P, Zheng D W, et al. Exploration prospect and post-ore denudation in the northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from apatite fission track thermochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2010, 26: 3597–3611 [柳振江, 王建平, 郑德文, 等. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据. *岩石学报*, 2010, 26: 3597–3611]
- 117 He J Q, Ding R X, Liang S Y, et al. Study of thermal evolution of the North Yellow Sea basin based on apatite fission track (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 3347–3353 [何将启, 丁汝鑫, 梁世友, 等. 基于磷灰石裂变径迹约束的北黄海盆地热演化研究. *地球物理学报*, 2014, 57: 3347–3353]
- 118 Chen Z L, Han F B, Yang N, et al. Topographic erosive diversities of the Xiangshan uranium ore-field, Jiangxi Province and its implication

- fro ore-preservation: Evidences from fission track dating of apatite (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 2371–2384 [陈正乐, 韩凤彬, 杨农, 等. 江西相山铀矿田地貌剥蚀特征及其控矿意义——磷灰石裂变径迹证据. *地球物理学报*, 2012, 55: 2371–2384]
- 119 Wang Y H, Wang S C, Kang T S. Fission track analysis of zircon and apatite from the Litian Nappe structural belt, West Fujian (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1994, 39: 423–726 [汪屹华, 王世成, 康铁笙. 闽西南里田推覆构造带锆石和磷灰石的裂变径迹分析. *科学通报*, 1994, 39: 423–726]
- 120 Liu J L, Davis G A, Lin Z Y, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 2005, 407: 65–80
- 121 Liu J L, Shen L, Ji M, et al. The Liaonan/Wanfu metamorphic core complexes in the Liaodong Peninsula: Two stages of exhumation and constraints on the destruction of the North China Craton. *Tectonics*, 2013, 32: 1121–1141
- 122 Shen X M, Zhang H Y, Zhang B Y. A preliminary study of relationship between metamorphic core complexes and lithospheric thinning over the Mesozoic in South China (in Chinese). *Geotect Metall*, 2008, 32: 11–19 [沈晓明, 张海祥, 张伯友. 华南中生代变质核杂岩构造及其与岩石圈减薄机制的关系初探. *大地构造与成矿*, 2008, 32: 11–19]
- 123 Martín A M, Vicente G D, Lozano J F, et al. Spectral analysis of the gravity and elevation along the western Africa-Eurasia plate tectonic limit: Continental versus oceanic lithospheric folding signals. *Tectonophysics*, 2010, 495: 298–314
- 124 Zhang K J. Destruction of the North China Craton: Lithosphere folding-induced removal of lithospheric mantle? *J Geodyn*, 2012, 53: 8–17
- 125 Burg J P, Schmalholz S M. Viscous heating allows thrusting to overcome crustal-scale buckling: Numerical investigation with application to the Himalayan syntaxes. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 274: 189–203
- 126 Cloetingh S, Burov E B, Poliakov A. Lithosphere olding: Primary responseto compression? (From central Asia to Paris basin). *Tectonics*, 1999, 18: 1064–1083
- 127 Nikishin A M, Cloetingh S, Lobkovsky L I, et al. Continental lithosphere folding in Central Asia (Part I): Constraints from geological observations. *Tectonophysics*, 1993, 226: 59–72
- 128 Burov E B, Lobkovsky L I, Cloetingh S, et al. Continental lithosphere folding in Central Asia (Part II): Constraints from gravity and topography. *Tectorwphysics*, 1993, 226: 73–87
- 129 Xiong X S, Gao R, Li Y K, et al. The lithosphere structure of the Great Xing'an Range in the eastern Central Asian Orogenic Belt: Constraints from the joint geophysical profiling. *J Asian Earth Sci*, 2015, 113: 481–490
- 130 Hou H S, Wang H Y, Gao R, et al. Fine crustal structure and deformation beneath the Great Xing'an Ranges, CAOBS: Revealed by deep seismic reflection profile. *J Asian Earth Sci*, 2015, 113: 491–500
- 131 Lu K Z, Dai J S. Formation and Evolution of the Jiaolai Basin (in Chinese). Dongying: Petroleum University Press, 1994. 1–174 [陆克政, 戴俊生. 胶莱盆地的形成和演化. 东营: 石油大学出版社, 1994. 1–174]
- 132 Zhang B, Wu Z P, Liu H, et al. Fracture properties and formation mechanism of Laixi fault in Laiyang Sag, Jiaolai Basin (in Chinese). *Pet Geol Exp*, 2017, 39: 213–221 [张波, 吴智平, 刘华, 等. 胶莱盆地莱阳凹陷莱西断层断裂性质及成因机制. *石油实验地质*, 2017, 39: 213–221]
- 133 Zhu G, Song C Z, Wang D X, et al. Tectonic implication and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of strike-slipping of Tanlu fault belt (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2001, 31: 250–256 [朱光, 宋传中, 王道轩, 等. 郯庐断裂带走滑时代的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 250–256]
- 134 Shang Y J, Xia B D, Lin H M, et al. An approach to late Mesozoic escape tectonics in Lower Yangtze Region (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 1997, 18: 177–182 [尚彦军, 夏邦栋, 林鹤鸣, 等. 下扬子区晚中生代逃逸构造初探. *石油与天然气地质*, 1997, 18: 177–182]
- 135 Xu Z Y, Lin K, Liu C Y, et al. A discussion on amalgamation course between the South China and North China Blocks: Evidence from deformational characters in the Jiangnan Superimposed Basin (in Chinese). *Chin J Geol*, 2004, 32: 284–295 [徐政语, 林舸, 刘池阳, 等. 从江汉叠合盆地构造形变特征看华南与华北陆块的拼贴过程. *地质科学*, 2004, 32: 284–295]
- 136 Wen Q B, Liu Y J, Han G Q, et al. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the basin group in eastern Helongjiang, China (in Chinese). *Glob Geol*, 2008, 27: 370–377 [温泉波, 刘永江, 韩国卿, 等. 黑龙江东部盆地群中、新生代构造演化. *世界地质*, 2008, 27: 370–377]
- 137 Chen X H, Wang X F, Zhang Q, et al. Geochronologic study on the formation and evolution of Tan-Lu Fault (in Chinese). *J Changchun Univ Sci Technol*, 2000, 30: 215–220 [陈宣华, 王小凤, 张青, 等. 郯庐断裂带形成演化的年代学研究. *长春科技大学学报*, 2000, 30: 215–220]
- 138 Zhang Q, Wang Y, Qian Q, et al. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2001, 17: 236–244 [张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义. *岩石学报*, 2001, 17: 236–244]
- 139 Zhang L M, Wang C S, Cao K, et al. High elevation of Jiaolai Basin during the Late Cretaceous: Implication for the coastal mountains along the East Asian margin. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 456: 112–123

- 140 Li P, Zhang X Y, Zhu A A, et al. The migration of subsidence centers and its controlling mechanism during post-rift inversion stage of Songliao Basin (in Chinese). *Res Environ Eng*, 2017, 31: 27–41 [李朋, 张翔阳, 祝安安, 等. 松辽盆地裂后反转期沉降中心迁移及其发育机制. *资源环境与工程*, 2017, 31: 27–41]
- 141 Jia C Z, Zheng M. Sedimentary history, tectonic evolution of Cretaceous Dasanjiang Basin in Northeast China and the significance of oil and gas exploration of its residual basins (in Chinese). *J Daqing Pet Inst*, 2010, 34: 1–12 [贾承造, 郑民. 东北白垩纪大三江盆地沉积构造演化及其残留盆地群的油气勘探意义. *大庆石油学院学报*, 2010, 34: 1–12]
- 142 Zhang Y P, Ren J Y, Wang S, et al. The sedimentary evidence for the existence of unified basin in Early Cretaceous in Dasanjiang basin group, Northeast China (in Chinese). *Geol Chin*, 2016, 43: 1280–1290 [张云鹏, 任建业, 王珊, 等. 东北大三江盆地群早白垩世存在统一湖盆的沉积学证据. *中国地质*, 2016, 43: 1280–1290]
- 143 Ge X H, Ma W P. *China Regional Tectonics Tutorial* (in Chinese). Beijing: Geological Press, 2014. 1–466 [葛肖虹, 马文璞. *中国区域大地构造学教程*. 北京: 地质出版社, 2014. 1–466]
- 144 Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, et al. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *J Geophys Res*, 2000, 105: 13303–13338
- 145 Zhu G, Jiang D Z, Zhang B L, et al. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics. *Gondwana Res*, 2012, 22: 86–103
- 146 Zhu G, Chen Y, Jiang D Z, et al. Rapid change from compression to extension in the North China Craton during the Early Cretaceous: Evidence from the Yunmengshan metamorphic core complex. *Tectonophysics*, 2015, 656: 91–110
- 147 Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization. *Earth-Sci Rev*, 2014, 131: 49–87
- 148 Zhai M G, Zhang Y B, Zhang X H, et al. Renewed profile of the Mesozoic magmatism in Korean Peninsula: Regional correlation and broader implication for cratonic destruction in the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2016, 59: 2355–2388
- 149 Zhang Q, Jin W J, Li C D, et al. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in Eastern China: Relation to large igneous province (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2009, 16: 21–51 [张旗, 金惟俊, 李承东, 等. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄: 与大火成岩省的关系. *地学前缘*, 2009, 16: 21–51]
- 150 Yang J H, Sun J F, Zhang J H, et al. Petrogenesis of Late Triassic intrusive rocks in the northern Liaodong Peninsula related to decratonization of the North China Craton: Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence. *Lithos*, 2012, 153: 108–128
- 151 Guo H L, Xu P F, Zhang Q F. P wave velocity structure of the North China Craton and West Pacific active continental margin: Exploration for dynamic processes of lithospheric thinning (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 2352–2361 [郭慧丽, 徐佩芬, 张福勤. 华北克拉通及东邻西太平洋活动大陆边缘地区的P波速度结构: 对岩石圈减薄动力学过程的探讨. *地球物理学报*, 2014, 57: 2352–2361]
- 152 Zhang Y Q, Ma Y S, Yang N, et al. Late Cenozoic left-slip faulting process of the East Kunlun-Qingling Fault System in West Qinling Region and its eastward propagation (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2005, 26: 1–8 [张岳桥, 马寅生, 杨农, 等. 西秦岭地区东昆仑-秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展. *地球学报*, 2005, 26: 1–8]
- 153 Jiang N, Liu Y, Zhou W, et al. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acad*, 2007, 71: 2591–2608
- 154 Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: Implications for cratonic lithospheric destruction. *Lithos*, 2012, 155: 1–18
- 155 Wang YJ, Fan W M, Sun M, et al. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 2007, 96: 475–502
- 156 Zhang S B, Zheng Y F. Formation and evolution of Precambrian continental lithosphere in South China. *Gondwana Res*, 2013, 23: 1241–1260
- 157 Yu J H, Xu X S, O'Reilly S Y, et al. Granulite xenoliths from Cenozoic Basalts in SE China provide geochemical fingerprints to distinguish lower crust terranes from the North and South China tectonic blocks. *Lithos*, 2003, 67: 77–102
- 158 Liu F L, Wang F, Liou J G, et al. Mid-Late Triassic metamorphic event for Changhai meta-sedimentary rocks from the SE Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton: Evidence from monazite U-Th-Pb and muscovite Ar-Ar dating. *J Asian Earth Sci*, 2014, 94: 205–225
- 159 Liu F L, Liu L S, Liu P H, et al. A relic slice of archaean-early Paleoproterozoic basement of Jiaobei Terrane identified within the Sulu UHP belt: Evidence from protolith and metamorphic ages from meta-mafic rocks, TTG-granitic gneisses, and metasedimentary rocks in the Haiyangsuo region. *Precambrian Res*, 2017, 303: 117–152
- 160 Peng P, Zhai M, Guo J, et al. Petrogenesis of Triassic post-collisional syenite plutons in the Sino-Korean craton: An example from North Korea. *Geol Mag*, 2008, 145: 637–647
- 161 Liu L P, Li Z X, Danišfk M, et al. Thermochronology of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane: Implications for continental collision and lithospheric thinning. *Tectonophysics*, 2017, 712-713: 10–29

- 162 Han R H, Ree J, Cho D, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of pyroclastic rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and their implication for the Mesozoic tectonics. *Gondwana Res*, 2006, 9: 106–117
- 163 Wu F, Han R, Yang J, et al. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chem Geol*, 2007, 238: 232–248
- 164 Zhang Y B, Wu F Y, Yang Z H, et al. Petrogenesis and geological implications of Phanerozoic granitoids at northern Korean Peninsula. *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 3098–3122 [张艳斌, 吴福元, 杨正赫, 等. 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩成因研究及地质意义. *岩石学报*, 2016, 32: 3098–3122]
- 165 Sun M D. Late Mesozoic magmatism and its tectonic implication for the Jianusi Block and adjacent areas of NE China (in Chinese). Doctor Dissertation. Zhejiang: Zhejiang University, 2013 [孙明道. 中国东北佳木斯地块及邻区晚中生代岩浆作用和构造意义. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2013]
- 166 Choi S, Ryu I, Park S, et al. Cretaceous epithermal gold-silver mineralization and geodynamic environment, Korea. *Ore Geol Rev*, 2005, 26: 115–135
- 167 Chang K. Cretaceous stratigraphy and paleocurrent analysis of Kyongsang Basin, Korea (in Korean). *J Geol Soc Korea*, 1988, 24: 194–205
- 168 Zhang X, Yuan L, Wilde S. Crust/mantle interaction during the construction of an extensional magmatic dome: Middle to Late Jurassic plutonic complex from western Liaoning, North China Craton. *Lithos*, 2014, 205: 185–207
- 169 Sonehara T, Harayama S. Petrology of the Nohi Rhyolite and its related granitoids: A Late Cretaceous large silicic igneous field in central Japan. *J Volcanol Geoth Res*, 2007, 167: 57–80
- 170 Xing G F, Chen R, Yang Z L, et al. Characteristics and tectonic setting of late Cretaceous volcanic magmatism in the coastal Southeast China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2009, 25: 77–91 [邢光福, 陈荣, 杨祝良, 等. 东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景. *岩石学报*, 2009, 25: 77–91]
- 171 Jolivet L, Tamaki K, Fournier M. Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis. *J Geophys Res*, 1994, 99: 22237–22259
- 172 Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Petrogenesis of Late Triassic granitoids and their enclaves with implications for post-collisional lithospheric thinning of the Liaodong Peninsula, North China Craton. *Chem Geol*, 2007, 242: 155–175
- 173 Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Jurassic shoshonitic lamprophyre dikes from the Liaodong Peninsula, NE China. *Miner Petrol*, 2010, 100: 127–151
- 174 Wang H, Xu Z W, Lu X C, et al. Two-types of Early Cretaceous adakitic porphyries from the Luxi terrane, eastern North China Block: Melting of subducted Paleo-Pacific slab and delaminated newly underplated lower crust. *Lithos*, 2016, 240–243: 140–154
- 175 Zhang J, Li S Z, Li X Y, et al. Yanshanian deformation of the Luxi area: Tectonic response to the Paleo-Pacific Plate subduction (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 226–238 [张剑, 李三忠, 李玺瑶, 等. 鲁西地区燕山期构造变形: 古太平洋板块俯冲的构造响应. *地学前缘*, 2017, 24: 226–238]
- 176 Cao X Z, Li S Z, Xu L Q, et al. Mesozoic to the Cenozoic Evolution and mechanism of tectonic geomorphology in the central North China Block: Constrains by apatite fission track thermochronology. *J Asian Earth Sci*, 2015, 114: 41–53
- 177 Xu L Q, Li S Z, Guo L L, et al. Impaction of the Tan-Lu Fault Zone on uplift of the Luxi Rise: Constraints from apatite fission track thermochronology (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 1153–1170 [许立青, 李三忠, 郭玲莉, 等. 郯庐断裂带对鲁西隆升过程的影响: 磷灰石裂变径迹证据. *岩石学报*, 2016, 32: 1153–1170]
- 178 Wang D Z, Zhao G T, Qiu J S. The tectonic constraint on the late Mesozoic A-type granitoids in Eastern China (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 1995, 1: 13–21 [王德滋, 赵广涛, 邱检生. 中国东部晚中生代 A 型花岗岩的构造制约. *高校地质学报*, 1995, 1: 13–21]
- 179 Wang L L, Xu Z J, Cheng R H, et al. Zircon U-Pb geochronology of Early Jurassic-Late Cretaceous volcanic rocks in North Yellow Sea Basin (in Chinese). *Geotect Metall*, 2015, 39: 179–186 [王嘹亮, 许中杰, 程日辉, 等. 北黄海盆地上侏罗统-下白垩统火山岩形成时代: 锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年证据. *大地构造与成矿学*, 2015, 39: 179–186]
- 180 Qiu J S, Wang D Z, Luo Q H, et al. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating for volcanic rocks of Qingshan formation in Jiaolai Basin, Eastern Shandong Province: A case study of the Fenlingshan volcanic apparatus in Wulian County (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 2001, 7: 351–355 [邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年——以五莲分岭山火山机构为例. *高校地质学报*, 2001, 7: 351–355]
- 181 Xi S L, Li Z H, Liu X S. Discovery and significance of the Mesozoic igneous carbonate rock at the southwestern margin of Ordos Basin (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2016, 37: 173–188 [席胜利, 李振宏, 刘新社. 鄂尔多斯盆地西南缘中生代火成碳酸盐岩的发现及意义. *石油与天然气地质*, 2016, 37: 173–188]
- 182 Kusky T M, Windley B F, Wang L, et al. Flat slab subduction, trench suction, and craton destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian cratons. *Tectonophysics*, 2014, 630: 208–221
- 183 Hu Z Q, Zhu G, Liu G S, et al. Timing of Jura-type fold belt in Eastern Sichuan: Evidence from unconformities (in Chinese). *Geol Rev*, 2009, 55: 32–42 [胡召奇, 朱光, 刘国生, 等. 川东“侏罗山式”褶皱带形成时代: 不整合面的证据. *地质论评*, 2009, 55: 32–42]

- 184 Liu B, Li S Z, Jin C, et al. Structural features and evolution of the Hechi-Yizhou Fault Zone, Northern Guangxi—Insights from shallow to deep structures of its Liucheng segment (in Chinese). *Geotect Metall*, 2009, 33: 488–496 [刘博, 李三忠, 金宠, 等. 桂北河池——宜州断裂带及邻区构造特征及其演化: 柳城段浅部到深部构造的启示. *大地构造与成矿学*, 2009, 33: 488–496]
- 185 Jin C, Wang Y J, Li S Z, et al. Diachronous and progressive deformation during the Indosinian-Yanshanian movements of the Xuefeng Mountain in intracontinental composite tectonic system (in Chinese). *Oil Gas Geol*, 2009, 30: 598–607 [金宠, 李三忠, 王岳军, 等. 雪峰陆内复合构造系统印支——燕山期构造变形的递变、穿时特征. *石油与天然气地质*, 2009, 30: 598–607]
- 186 Li Z X, Fang D J, Powell C M, et al. The evolution of the bend mountain structure and the relative rotation of massif in Southern China since Mesozoic—Geological and paleomagnetic evidence (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1996, 41: 446–450 [李正祥, 方大钧, Powell C M, 等. 华南中生代以来弯山构造的发育和地块相对旋转——地质和古地磁证据. *科学通报*, 1996, 41: 446–450]
- 187 Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. Tectonics of South China continent and its implications. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 1804–1828
- 188 Feng X J, Cai D S, Wang C X, et al. The Meso-Cenozoic tectonic evolution in East China Sea Shelf Basin (in Chinese). *Chin Offshore Oil Gas (Geol)*, 2003, 17: 33–37 [冯晓杰, 蔡东升, 王春修, 等. 东海陆架盆地中生代构造演化特征. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17: 33–37]
- 189 Yi H, Zhang L, Lin Z. Mesozoic tectonic framework and basin distribution characteristics of northern margin of South China Sea (in Chinese). *Petrol Geol Exp*, 2012, 34: 388–394 [易海, 张莉, 林珍. 南海北部中生代构造格局与盆地发育特征. *石油实验地质*, 2012, 34: 388–394]
- 190 Shu L S, Yan W, Sha J G, et al. Jurassic sedimentary features and tectonic settings of southeastern China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 1969–1978
- 191 Shu L S, Wang D Z. A comparison study of basin and range tectonics in the Western North America and Southeastern China (in Chinese). *Geol J Chin Univ*, 2006, 12: 1–13 [舒良树, 王德滋. 北美西部与中国东南部盆岭构造对比研究. *高校地质学报*, 2006, 12: 1–13]
- 192 Li J H, Zhang Y Q, Dong S W, et al. The Hengshan low-angle normal fault zone: Structural and geochronological constraints on the Late Mesozoic crustal extension in South China. *Tectonophysics*, 2013, 606: 97–115
- 193 Zhang Y Q, Dong S W, Li J H, et al. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2012, 33: 259–279 [张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展. *地球学报*, 2012, 33: 259–279]
- 194 Liu E S, Li S Z, Jin C, et al. Yanshanian structural deformation and dynamics of the Xuefengshan intracontinental tectonic system (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2010, 30: 63–74 [刘恩山, 李三忠, 金宠, 等. 雪峰陆内构造系统燕山期陆内构造变形特征和动力学. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30: 63–74]
- 195 Long K, Chen H D, Lin L B, et al. Cretaceous tectonic sequence and Litho-Paleogeographic evolution in the Sichuan Basin (in Chinese). *J Stratigr*, 2011, 35: 328–336 [隆轲, 陈洪德, 林良彪, 等. 四川盆地白垩纪构造层序、岩相古地理及演化. *地层学杂志*, 2011, 35: 328–336]
- 196 Liu X. Some recognitions on the sedimentary-tectonic development of the Meso-Cenozoic basins in Eastern China (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1988, 62: 111–122 [刘训. 对中国东部中、新生代盆地沉积-构造发展的几点认识. *地质学报*, 1988, 62: 111–122]
- 197 Xu J W, Zhu G, Tong W X. Formation and evolution of the Tancheng-Lujiang wrench fault system: A major shear system to the north-west of the Pacific Ocean. *Tectonophysics*, 1987, 134: 273–310
- 198 Li J W, Zhou M F, Li X F, et al. The Hunan-Jiangxi strike-slip fault system in southern China: Southern termination of the Tan-Lu fault. *J Geodyn*, 2001, 32: 333–354
- 199 Cai J X. An early Jurassic dextral strike-slip system in southern South China and its tectonic significance. *J Geodyn*, 2013, 63: 27–44
- 200 Zhou D, Ru K, Chen H Z. Kinematics of Cenozoic extension on the South China Sea continental margin and its implications for the tectonic evolution of the region. *Tectonophysics*, 1995, 251: 161–177
- 201 Cheng S X, Li S Z, Suo Y H, et al. Cenozoic tectonics and dynamics of basin groups of the northern South China Sea (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2012, 32: 79–93 [程世秀, 李三忠, 索艳慧, 等. 南海北部新生代盆地群构造特征及其成因机制. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32: 79–93]
- 202 Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, et al. Continental margin basins in East Asia: Tectonic implication of the Meso-Cenozoic East China sea pull-apart basins. *Geol J*, 2015, 50: 139–156
- 203 Li Z, Ni L M, Xu J Q. The upper Proterozoic-Paleozoic records of sedimentary sequences and detrital zircon geochronology in Korean Peninsula and North China: Implications for tectonic attributes and division (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2016, 32: 3139–3154 [李忠, 倪玲梅, 徐建强. 朝鲜半岛及华北上元古界-古生界沉积序列与碎屑锆石年代学记录及其构造属性分析. *岩石学报*, 2016, 32: 3139–3154]
- 204 Wang D Z, Shen W Z. Genesis of granitoids and crustal evolution in Southeast China (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2009, 10: 209–220 [王德滋, 沈渭洲. 中国东部花岗岩成因与地壳演化. *地学前缘*, 2003, 10: 209–220]

- 205 Shu L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2012, 31: 1035–1053 [舒良树. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 2012, 31: 1035–1053]
- 206 Suo Y H, Li S Z, Zhao S J, et al. Cenozoic tectonic jumping of pull-apart basins in East Asia and its continental margin: Implication to hydrocarbon accumulation. *J Asian Earth Sci*, 2014, 88: 28–40
- 207 Kadarusman A, Miyashita S, Maruyama S, et al. Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, 2004, 392: 55–83
- 208 Zhang Q, Wang Y L, Jin W J, et al. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic: Evidence, problems and implication (in Chinese). *Geol Bull Chin*, 2008, 27: 1404–1430 [张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示. *地质通报*, 2008, 27: 1404–1430]
- 209 Yumul H B, Graciano P, Yumul Jr. Mio-Pliocene magmatism in the Baguio Mining District (Luzon, Philippines): Age clues to its geodynamic setting. *Comptes Rendus de l'Académie des Sci-Ser IIA-Earth Planet Sci*, 2000, 331: 295–302
- 210 Huan W L, Shi Z L, Jun J Q. Meso-Cenozoic tectonic evolution of Eastern China and adjacent area and movement of the Pacific Plate (in Chinese). *Sci Geol Sin*, 1982, 2: 179–190 [环文林, 时振梁, 郡家全. 中国东部及邻区中生代构造演化与太平洋板块运动. *地质科学*, 1982, 2: 179–190]
- 211 Otsuki K. Oblique subduction, collision of microcontinents and subduction of oceanic ridge: Their implications on the Cretaceous tectonics of Japan. *Isl Arc*, 1992, 1: 51–63
- 212 Engebretson D C, Cox A, Gorden R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *Geol Soc Am*, 1985, 206(Suppl): 1–59
- 213 Ma X X, Dong W C, Tang L M, et al. Petrological evidence of Mesozoic tectonic extension in the coastal area of SE China: The special-temporal distribution and geochemical constraints on the mafic rocks from Hainan, Guangdong, Fujian and Zhejiang Provinces, South China (in Chinese). *J Zhejiang Univ (Sci Ed)*, 2013, 40: 683–692 [马晓雄, 董传万, 唐立梅, 等. 华南沿海地区中生代岩石圈伸展的岩石学制约: 琼粤闽浙镁铁质岩时空分布与地球化学研究. *浙江大学学报(理学版)*, 2013, 40: 683–692]
- 214 Wan T F, Zhao Q Y. The genesis of tectono-magmatism in eastern China (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2012, 42: 155–163 [万天丰, 赵庆乐. 中国东部构造-岩浆作用的成因. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42: 155–163]
- 215 Liu C Z. Nature and formation age of the Phanerozoic sub-continental lithospheric mantle in South China (in Chinese). *Acta Petrol Mineral*, 2013, 32: 637–651 [刘传周. 华南显生宙时期岩石圈地幔的性质与形成时代. *岩石矿物学杂志*, 2013, 32: 637–651]
- 216 Huang L, Liu C Y, Kusky T M. Cenozoic evolution of the Tan-Lu Fault Zone (East China)—Constraints from seismic data. *Gondwana Res*, 2015, 28: 1079–1095
- 217 Breitsprecher K, Thorkelson D J, Groome W G, et al. Geochemical confirmation of the Kula-Farallon slab window beneath the Pacific Northwest in Eocene time. *Geology*, 2003, 31: 351–354
- 218 Yuan X C, Hua J R. 3D lithospheric structure of South China (in Chinese). *Geol Chin*, 2011, 38: 1–19 [袁学诚, 华九如. 华南岩石圈三维结构. *中国地质*, 2011, 38: 1–19]
- 219 Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 2000, 326: 269–287
- 220 Huangfu P P, Wang Y J, Cawood P A, et al. Thermo-mechanical controls of flat subduction: Insights from numerical modeling. *Gondwana Res*, 2016, 40: 170–183
- 221 Dong C W, Zhou X M, Li H M, et al. Late Mesozoic crust mantle interaction in southeastern Fujian: Isotopic evidence from Pingtan Igneous Complex. *Chin Sci Bull*, 1997, 42: 959–963 [董传万, 周新民, 李惠民, 等. 闽东南晚中生代的壳幔作用: 平潭火成杂岩的同位素证据. *科学通报*, 1997, 42: 959–963]
- 222 Zhou X H, Ying J F, Zhang L C, et al. The petrogenesis of Late Mesozoic volcanic rock and the contributions from Ancient Micro-Continents: Constraints from the zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic systematics (in Chinese). *Earth Sci*, 2009, 34: 1–10 [周新华, 英基丰, 张连昌, 等. 大兴安岭晚中生代火山岩成因与古老地块物质贡献: 锆石 U-Pb 年龄及多元同位素制约. *地球科学*, 2009, 34: 1–10]
- 223 Cao X Z, Flament N, Mueller D, et al. The dynamic topography of eastern China Since the latest Jurassic Period. *Tectonics*, 2018, doi: <https://doi.org/10.1029/2017TC004830>
- 224 Liu S, Steel R, Zhang G. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: Record of continent-continent collision. *J Asian Earth Sci*, 2005, 25: 9–27
- 225 Li S Z, Suo Y H, Santosh M, et al. Mesozoic to Cenozoic intracontinental dynamics of the North China Block. *Geol J*, 2013, 48: 543–560
- 226 Li S Z, Yang Z, Zhao S J, et al. Global Early Paleozoic orogens (I): Collision-Type orogeny (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2016, 46: 968–1004 [李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(I): 碰撞型造山. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46: 945–967]

- 227 Li S Z, Yang Z, Zhao S J, et al. Global Early Paleozoic orogens (II): Subduction-accretionary-type orogeny (in Chinese). *J Univ (Earth Sci Ed)*, 2016, 46: 968–1004 [李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(II): 俯冲-增生型造山. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46: 968–1004]
- 228 Li S Z, Li X Y, Zhao S J, et al. Global Early Paleozoic orogens (III): Intracontinental orogen in South China (in Chinese). *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2016, 46: 1005–1025 [李三忠, 李玺瑶, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(III): 华南陆内造山. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46: 1005–1025]
- 229 Li S Z, Yang Z, Zhao S J, et al. Global Early Paleozoic Orogens (IV): Plate reconstruction and supercontinent Carolina. *J Jilin Univ (Earth Sci Ed)*, 2016, 46: 1025–1041 [李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带(IV): 板块重建与Carolina超大陆. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46: 1025–1041]
- 230 Cui J J, Zhang Y Q, Dong S W, et al. Late Mesozoic orogenesis along the coast of Southeast China and its geological significance (in Chinese). *Geol Chin*, 2013, 40: 86–105 [崔建军, 张岳桥, 董树文, 等. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义. *中国地质*, 2013, 40: 86–105]
- 231 Tang J, Xu W L, Niu Y L, et al. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous-Paleocene granitoids in the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Petrogenesis and implications for the oblique subduction of the paleo-Pacific Plate. *Lithos*, 2016, 266–267: 202–212
- 232 Oh C W. A new concept on tectonic correlation between Korea, China and Japan: Histories from the late Proterozoic to Cretaceous. *Gondwana Res*, 2006, 9: 47–61
- 233 Fitches W R, Zhu G. Is the Ogcheon metamorphic belt of Korea the eastward continuation of the Nanhua Basin of China? *Gondwana Res*, 2006, 9: 68–84
- 234 Kwon S, Sajeev K, Mitra G, et al. Evidence for Permo-Triassic collision in far east Asia: The Korean collisional orogen. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 279: 340–349
- 235 Kim S W, Kwon S, Santosh M, et al. A Paleozoic subduction complex in Korea: SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic implications. *Gondwana Res*, 2011, 20: 890–903
- 236 Park S I, Kim S W, Kwon S, et al. Paleozoic tectonics of the southwestern Gyeonggi massif, South Korea: Insights from geochemistry, chromian-spinel chemistry and SHRIMP U-Pb geochronology. *Gondwana Res*, 2014, 26: 684–698
- 237 Oh C W, Imayama T, Lee S Y, et al. Permo-Triassic and Paleoproterozoic metamorphism related to continental collision in Yangpyeong, South Korea. *Lithos*, 2015, 216–217: 264–284
- 238 Li S Z, Zhang Y, Guo L L, et al. Mesozoic deformation and accretionary orogenic processes around the Nadan-hada Terrane (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2017, 24: 200–212 [李三忠, 张勇, 郭玲莉, 等. 那丹哈达地体及周缘中生代变形与增生造山过程. *地学前缘*, 2017, 24: 200–212]
- 239 Shang Y J, Yue Z Q, Xia B D, et al. A tectonic escape model for the formation of sedimentary basins in the Yangzhou block of the Lower Yangtze Region, eastern China. *J Asian Earth Sci*, 2002, 20: 105–117
- 240 Li S Z, Suo Y H, Dai L M, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2010, 17: 64–89 [李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成于华北克拉通破坏. *地学前缘*, 2010, 17: 64–89]
- 241 Tang K D, Wang Y, He G Q, et al. Continental marginal tectonics in northeastern China and adjacent areas (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 1995, 69: 16–30 [唐克东, 王莹, 何国琦, 等. 中国东北及邻区大陆边缘构造. *地质学报*, 1995, 69: 16–30]
- 242 Xu Z Q, Hou L W, Wang D K, et al. Thin-skinned tectonics and foreland thrust sheets in the Songpan-Ganze Orogenic Belt in Southwestern China (in Chinese). *Bull Chin Acad Geol Sci*, 1990, 11: 126–129 [许志琴, 侯立玮, 王大可, 等. 中国西南部松潘-甘孜中生代碰撞型造山带的薄壳构造及前陆逆冲系. *中国地质科学院院报*, 1990, 11: 126–129]
- 243 Yu S J. Geometrical characteristics and strain analysis of nappe structures in the northern section of Longmenshan (in Chinese). *J Mineral Petrol*, 2000, 20: 67–74 [于苏俊. 龙门山北段推覆构造的几何特征及应变分析. *矿物岩石*, 2000, 20: 67–74]
- 244 Li S Z, Zhang G W, Li Y L, et al. Tectonic Implication and metamorphism of Sanchazi metagabbro from MianLue Suture Zone of Qinling Orogenic Belt (in Chinese). *J Ocean Univ Qingdao*, 2001, 31: 89–94 [李三忠, 张国伟, 李亚林, 等. 勉略带三岔子蛇绿岩的变质特征及构造意义. *青岛海洋大学学报*, 2001, 31: 89–94]
- 245 Luo D Q, Yun J B, Li Y X. Positive structural inversion and the mechanism analysis in Songliao Basin (in Chinese). *J Daqing Pet Inst*, 1994, 18: 17–21 [罗笃清, 云金表, 李玉喜. 松辽盆地的正构造反转及其形成机制探讨. *大庆石油学院学报*, 1994, 18: 17–21]
- 246 Wang Y, Wan J L, Li D M, et al. Thermochronological evidence of tectonic uplift in Nyalam, South Tibetan detachment system (in Chinese). *Bull Miner Petrol Geochem*, 2001, 20: 292–294 [王瑜, 万景林, 李大明, 等. 藏南伸展拆离系聂拉木一带构造抬升的热年代学证据. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20: 292–294]
- 247 Shephard G E, Müller R D, Seton M. The tectonic evolution of the Arctic since Pangea breakup: Integrating constraints from surface geology and geophysics with mantle structure. *Earth-Sci Rev*, 2013, 124: 148–183
- 248 Moore T E, Box S E. Age, distribution and style of deformation in Alaska north of 60°N: Implications for assembly of Alaska. *Tectonophysics*, 2016, 691: 133–170

- 249 Chen J D. Southeastern China continental margin petroleum basin and continental margin tectonic-structural zones (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1990, 11: 13–21 [陈景达. 中国大陆东、南缘构造带沉积盆地类型及其成因机制探讨. *石油学报*, 1990, 11: 13–21]
- 250 Hall R. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer-based reconstructions, model and animations. *J Asian Earth Sci*, 2002, 20: 353–431
- 251 Liu M, Cui X J, Liu F T. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: A mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? *Tectonophysics*, 2004, 393: 29–42
- 252 Suo Y H, Li S Z, Dai L M, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2012, 28: 2602–2618 [索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化. *岩石学报*, 2012, 28: 2602–2618]
- 253 Zhang J P, Li S Z, Zhang G H, et al. Formation, tectonic evolution and dynamics of the East China Sea Shelf Basin. *Geol J*, 2016, 51(Suppl): 162–175
- 254 Zhang G H, Li S Z, Suo Y H, et al. Cenozoic positive inversion tectonics and its migration in the East China Sea Shelf Basin. *Geol J*, 2016, 51(Suppl): 176–187
- 255 Guo X Y, Gao R, Li S Z, et al. Lithospheric architecture and deformation of NE Tibet: New insights on the interplay of regional tectonic processes. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 449: 89–95
- 256 Hall R. Late Jurassic-Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 2012, 570-571: 1–41
- 257 Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and back-arc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous. *Tectonophysics*, 2004, 384: 23–53
- 258 Li T D, Mo J. Tectonic framework of the west circum-Pacific tectonic tract and geological evolution of the East China Sea (in Chinese). *Mar Geol Quat Geol*, 2002, 22: 1–6 [李廷栋, 莫杰. 中国滨太平洋构造域构造格局和东海地质演化. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 1–6]
- 259 Jarrard R D. Relations among subduction parameters. *Rev Geophys*, 1986, 24: 217–284
- 260 van Hunen J, van den Berg A B, et al. A thermo-mechanical model of horizontal subduction below an overriding plate. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 182: 157–169
- 261 van Hunen J, van den Berg A B, Vlaar N J. Various mechanisms to induce present-day shallow flat subduction and implications for the younger Earth: A numerical parameter study. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 146: 179–194
- 262 Rodríguez-González J, Negredo A M, Billen M I. The role of the overriding plate thermal state on slab dip variability and on the occurrence of flat subduction. *Geochem Geophys Geosyst*, 2013, 13: Q01002, doi: 10.1029/2011GC003859
- 263 Sharples W, Jadamec M A, Moresi L N, et al. Overriding plate controls on subduction evolution. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2014, 119: 6684–6704

Summary for “西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造-岩浆响应”

Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone

Sanzhong Li^{1,2*}, Yanhui Suo^{1,2}, Xiyao Li^{1,2}, Yongming Wang^{1,2}, Xianzhi Cao^{1,2}, Pengcheng Wang^{1,2}, Lingli Guo^{1,2}, Shengyao Yu^{1,2}, Haoyuan Lan^{1,2}, Shaojun Li^{1,2}, Shujuan Zhao^{1,2}, Zaizheng Zhou^{1,2}, Zhen Zhang^{1,2} & Guowei Zhang³

¹ Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

² Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China;

³ Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

* Corresponding author, E-mail: sanzhong@ouc.edu.cn

The Mesozoic impact to the North China and the South China blocks in the East Asian Continental Margin by the West Pacific subduction processes and deep processes, the tectonic, magmatic mineralization and geomorphic evolutionary trends show some similarities, but there are also significant differences between them, the dynamic mechanism is generally believed to be caused by the Paleo-Pacific Plate subduction. But how they are related is a long-term unresolved question as a conundrum and a focus of geological researches, and a huge controversy is still remained. This paper systematically summarizes the comprehensive achievements of deformation analysis, igneous geochronology, tomography and other field observations in the East Asian Continental Margin in recent decade, briefly discussing the pre-Yanshanian final assembly of blocks and the formation of the unified continental margin in China, and mainly focusing on the review of Jurassic and Cretaceous geological processes in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone in the Yanshanian period. The temporal and spatial evolution of structural propagation, age zonation and migration of igneous rocks and huge tectono-morphological inversion in the Earth surface system, combined with deep processes are jointly to put forward: the destruction of the North China Craton was mainly affected by the westward early-stage layered rollback, delamination and thinning of the deep lithosphere, resulting in early Yanshanian westward migration of tectonism and magmatism following the middle-stage multiple-directional delamination and the late-stage eastward withdrawal of delamination; coevally, the combined effect of the closure of the Okhotsk Ocean to the north and the subduction of the Bangong-Co-Nujiang Ocean to the south made the East Asian Ocean-Continent Connection Zone under the tectonic setting of overall compression, the asthenosphere upwelling at depth continued an eastward migration to drive lithosphere continuously eastward and periodical, alternative extension and compression. The South China Block experienced the westward flat subduction at early stage, resulting in the westward propagation of deformation and magmatism, following the late two-stage delamination to induce the eastward tectono-magmatism. In summary, the tectono-magmatic differences between the North China and South China blocks are caused by their difference of the deep mantle processes and the East Asian plate superconvergence.

ocean-continent connection zone, Paleo-Pacific Plate, East Asia, Yanshanian, continental margin, subduction retreat

doi: 10.1360/N972017-01113